



TESIS-TL 142501

**STUDI PENGARUH UKURAN PARTIKEL TERHADAP
SIFAT FISIK-MEKANIK GEOPOLIMER SEMEN BERBASIS
TERAK FERONIKEL**

SADDAM HUSIN
NRP. 2714201007

DOSEN PEMBIMBING
Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D

PROGRAM MAGISTER
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



TESIS-TL 142501

**STUDY OF INFLUENCE PARTICLE SIZE TO PHYSICAL-
MECHANICAL PROPERTIES FERRONICKEL SLAG-BASED
GEOPOLYMER CEMENT**

SADDAM HUSIN
Student ID No. 2714201007

ADVISOR
Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D

MASTER PROGRAM
DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)

Di
Institut Teknologi Sepuluh November

Oleh:
Saddam Husin
NRP. 2714201007

Tanggal Ujian: Kamis, 21 Juli 2016
Periode Wisuda: Semester Genap 2015/2016

Disetujui Oleh

1. Sungging Pintowantoro, S.T, M.T., Ph.D
NIP. 196809302000031001

(Pembimbing I)

2. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng
NIP: 197605282002121003

(Penguji)

3. Mas Irfan P. Hidayat, ST. M.Sc, Ph.D
NIP: 197610272003121001

(Penguji)

4. Dr. Ing. Victor Yuardi R, S.T, M.Sc
NIP: -

(Penguji)



Direktur Program Pascasarjana

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D
NIP. 196012021987011001

STUDI PENGARUH UKURAN PARTIKEL TERHADAP SIFAT FISIK-MEKANIK GEOPOLIMER SEMEN BERBASIS TERAK FERONIKEL

Nama Mahasiswa : Saddam Husin
NRP : 2714201007
Pembimbing : Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D

ABSTRAK

Produksi semen portland menghasilkan 1 ton CO₂ untuk setiap ton semen yang dihasilkan. Pelepasan CO₂ yang semakin meningkat dapat menyebabkan peningkatan efek rumah kaca dan kerusakan lingkungan. Terak yang merupakan material sisa hasil peleburan mineral *ferrous* maupun *non ferrous* pada *blast furnace*, memiliki komposisi utama berupa silika (SiO₂) dan kapur (CaO) yang dapat dimanfaatkan sebagai pengganti semen konvensional sebagai geopolimer semen. Geopolimer diperoleh melalui reaksi geopolimerisasi. Geopolimerisasi melibatkan reaksi kimia antara material padat aluminosilikat dan larutan alkali. Pada penelitian ini geopolimer semen diperoleh dengan mereaksikan campuran terak feronikel (Fe-Ni) dengan variasi ukuran partikel 106, 90, 75 dan 63 µm dicampurkan dengan larutan alkali (NaOH 7 molar dan Na₂SiO₃ dengan rasio Na₂SiO₃/NaOH = 2,5). Campuran dicetak ke dalam kubus dengan dimensi 50x50x50 mm³ didiamkan selama 2 hari kemudian dioven (80°C, 24 jam). Selanjutnya dilakukan karakterisasi dan pengujian sifat fisik-mekanik geopolimer. Berdasarkan hasil penelitian kandungan senyawa-senyawa oksida berupa SiO₂ (43,07%), dan Al₂O₃ (9,13%). Karakterisasi XRD menampilkan kandungan senyawa *augite*, *forsterite*, *fayalite* dan *diopside* yang mengandung Si dan Al sebagai sumber aluminosilikat. Spektra FTIR menampilkan getaran SiO₄ *bending* (500-620 cm⁻¹) dan SiO₄ *stretching* (830-1010 cm⁻¹) terjadi peningkatan absorbansi pada panjang gelombang 868 cm⁻¹ yang menampilkan pembentukan geopolimer, terbentuknya puncak serapan baru 1419 cm⁻¹ berupa CO₃²⁻ asimetri. Kekuatan tekan maksimum sebesar 15,4 MPa dengan ukuran partikel 63 µm dan serapan air sebesar 8%. Semakin kecil partikel terak FeNi akan memperluas permukaan dan semakin banyak kontak dengan larutan aktivator alkali. Peningkatan kontak akan meningkatkan laju reaksi dan pelarutan Al dan Si dari material sumber (terak Fe-Ni). Berdasarkan pengamatan mikrostruktur terjadi pembentukan kristal amorfus hasil dari reaksi geopolimerisasi dan partikel yang tidak bereaksi bertindak sebagai penguat (*reinforce*).

Kata Kunci : geopolimer semen, sifat fisik-mekanik, terak feronikel

(halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDY OF INFLUENCE PARTICLE SIZE TO PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES FERRONICKEL SLAG-BASED GEOPOLYMER CEMENT

Name of Student : Saddam Husin
Student ID : 2714201007
Supervisor Lecture : Sungging Pintowantoro, ST., MT., Ph.D

ABSTRACT

Production of portland cement produces 1 ton CO₂ for each tons cement produced. Increasing of CO₂ release can cause increased greenhouse effect and environment damage. Slag is a waste materials from smelting mineral ferrous and nonferrous on the blast furnace, have the main composition of the formed by silica (SiO₂) and lime (CaO) which can be used as a substitute conventional cement as geopolymer cement. Geopolymer obtained through geopolymerization reaction. Geopolymerization involving chemical reactions between aluminosilicate solid material and alkali silicate solution. In this research, cement geopolymer prepared by reacting ferronickel (Fe-Ni) slag with particle size 106, 90, 75 and 63 µm mixed with an alkali solution (NaOH 7 molar and ratio Na₂SiO₃/NaOH = 2,5). After that, a mixture of casting in the cube with dimensions 50x50x50 mm and allowed to stand for 2 days put in the oven (80°C, 24 hours). Furthermore, doing characterization and physical-mechanical testing of geopolymer. Based on this research, composition oxide compound consisting SiO₂ (43,07%), dan Al₂O₃ (9,13%). XRD characterization show augite, forsterite, fayalite and diopside compound have Si and Al as aluminosilicate resources. FTIR analysis show vibration of SiO₄ bending (500-620 cm⁻¹) and SiO₄ stretching (830-1010 cm⁻¹), was happened increase absorbance on wavelength 868 cm⁻¹ that show the formation of geopolymer, presence new peak at 1419 cm⁻¹ that is CO₃²⁻ asymmetry. The maximum compressive strength of geopolymer is 15,4 MPa with a particle size of 63 µm and water absorption is 8%. The smaller particles of Fe-Ni slag will lead to increasing surface area and more and more contact with an alkaline activator solution. Increased contact will increase the reaction rate and the solubility of Al and Si from the source material (FeNi slag). Based on microstructure geopolymers occurs the formation of the amorphous structure and unreacted particles act as reinforcement.

Keywords: ferronickel slag , geopolymer cement, physical-mechanical properties

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	Hal
Halaman Judul.....	i
Halaman Pengesahan	iii
Abstrak	v
Abstract	vii
Kata Pengantar	ix
Daftar Isi.....	xiii
Daftar Gambar.....	xv
Daftar Tabel	xvii
 BAB 1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
 BAB 2. KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Terak	8
2.2.1 Pengertian Terak	8
2.2.2 Komposisi Terak.....	9
2.2.3 Diagram Fase Terak.....	10
2.3 Geopolimer	12
2.3.1 Pengertian Geopolimer	12
2.3.2 Reaksi Geopolimer.....	13
2.3.3 Larutan Aktivator	19
2.3.4 Semen dan Beton Geopolimer	21
2.3.5 Kategori Geopolimer Semen.....	22
2.3.6 Faktor yang Mempengaruhi Sifat Geopolimer	22
2.3.7 Aplikasi Geopolimer.....	23
2.3.8 Keuntungan Geopolimer.....	25
2.4 Ukuran Partikel dan Distribusi Ukuran Partikel	27
2.4.1 Pengertian Ukuran Partikel dan Distribusi Ukuran Partikel	27
2.4.2 Ukuran Partikel dan Luas Permukaan.....	28
2.5 Semen Portland Biasa	31
2.5.1 Pengertian	31
2.5.2 Jenis dan Penggunaan	31

2.5.3	Syarat Mutu	31
2.5.4	Pembuatan Semen Portland.....	34
 BAB 3. METODE PENELITIAN		
3.1	Bahan.....	39
3.2	Alat	41
3.3	Prosedur Penelitian.....	43
3.3.1	Diagram Alir Penelitian.....	43
3.3.2	Rancangan Variabel	44
3.3.3	Preparasi Aktivator.....	45
3.3.4	Pencampuran dan <i>Curing</i>	45
3.4	Pengujian	46
3.4.1	X-Ray Diffraction (XRD)	46
3.4.2	XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometry)	48
3.4.3	Fourier Transform Infrared (FTIR)	49
3.4.4	Serapan Air (Water Absorption)	51
3.4.5	Pengujian Kuat Tekan	52
3.4.6	Scanning Electron Microscope (SEM).....	53
3.4.7	Uji Statistik (Varian Standar Deviasi dan Standar Error)	54
 BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Hasil Penelitian.....	57
4.1.1	Pengujian XRD Terak Fe-Ni dan Geopolimer	57
4.1.2	Pengujian EDAX Terak Fe-Ni	59
4.1.3	Pengujian FTIR Terak Fe-Ni dan Geopolimer.....	61
4.1.4	Produk Geopolimer Semen Terak Fe-Ni.....	61
4.1.5	Pengujian Serapan Air Geopolimer Semen Fe-Ni	63
4.1.6	Pengujian Kekuatan Tekan.....	64
4.1.7	Pengamatan Mikrostruktur Geopolimer	65
4.2	Pembahasan	68
 BAB 5. PENUTUP		
5.1	Kesimpulan.....	77
5.2	Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA.....		79
LAMPIRAN		85

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Spektra FTIR Terak dan Geopolimer ($[\text{NaOH}] = 7 \text{ M}$; $[\text{SiO}_2] = 4 \text{ M}$; $S/L = 5,4 \text{ g/mL}$; temperatur <i>curing</i> 60°C	6
Gambar 2.2 Foto SEM pada Produk Geopolimer Berbahan Terak Fe-Ni, (a) Makrostruktur Perbesaran 100x, (b) Mikrostruktur Perbesaran 1000x, (c) Mikrostruktur Perbesaran 4000x, (d) Mikrostruktur Perbesaran 5000x	7
Gambar 2.3 Sistem $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$	10
Gambar 2.4 Sistem $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, diagram fase (<i>projection</i>) <i>continuous lines</i> : <i>lembah, broken lines: liquidus isotherms</i>	11
Gambar 2.5 Diagram Fase Sistem $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ (10%): <i>lembah-thin</i> <i>continuous lines</i> ; <i>liquidus isotherms-broken lines</i> ; <i>shadowed area-</i> <i>liquid blast furnace slag</i> pada 1.400°C	12
Gambar 2.6 Mekanisme Pemutusan <i>Glass</i> Aluminosilikat pada Tahap Awal Reaksi Geopolimerisasi	16
Gambar 2.7 Ternary Diagram Sistem $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$	21
Gambar 2.8 Data Kekuatan Awal pada Geopolimer yang Belum Mengalami Perlakuan Panas dan Setelah Mengalami Perlakuan pada Suhu 400, 600, dan 800°C	27
Gambar 2.9 Ilustrasi Tumbukan Atom Magnesium dan Ion Hidrogen dengan Perbedaan Luas Permukaan	29
Gambar 3.1 Terak FeNi (a) Bongkahan Terak FeNi; (b) Setelah Dihaluskan	39
Gambar 3.2 Serbuk Natrium Hidroksida	40
Gambar 3.3 Larutan Natrium Silikat <i>Extra Pure</i>	40
Gambar 3.4 Ayakan Mesh ASTM E11-04	41
Gambar 3.5 Oven dengan Kontrol Temperatur	42
Gambar 3.6 Cetakan Trigang	42
Gambar 3.7 Alat Uji Tekan	43
Gambar 3.8 Diagram Alir Penelitian	44
Gambar 3.9 Skema Kerja <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	47

Gambar 3.10 Mesin XRD PANalytical	48
Gambar 3.11 Prinsip Kerja XRF	49
Gambar 3.12 Skema Kerja Alat Spektroskopi Inframerah.....	50
Gambar 3.13 Konfigurasi Spesimen Selama Pengujian (ASTM C1403)	52
Gambar 3.14 Mekanisme Kerja SEM.....	53
Gambar 3.15 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	54
Gambar 4.1 Pola XRD (a) Terak FeNi; (b) Geopolimer Terak FeNi 63 μm	58
Gambar 4.2 Barisan Komposisi Clinopyroxenes Ca-Mg-Fe.....	59
Gambar 4.3 Spektrum FTIR (a) Terak FeNi dan (b) Geopolimer Terak Fe-Ni Ukuran 63 μm	61
Gambar 4.4 Sampel Geopolimer Semen 105 μm (15 _{1,2,3}) dan 95 μm (18 _{1,2,3}) (80°C, 24 jam).....	62
Gambar 4.5 Sampel Geopolimer Semen 75 μm (20 _{1,2,3}) dan 63 μm (23 _{1,2,3}) (80°C, 24 jam).....	62
Gambar 4.6 Grafik Absorpsi Air Geopolimer Semen dengan Variasi Ukuran Partikel.....	63
Gambar 4.7 Grafik Persentase Absorpsi Air Geopolimer Semen setelah 24 Jam.	64
Gambar 4.8 Kekuatan Tekan Geopolimer Semen Terak FeNi Umur 28 Hari	65
Gambar 4.9 Permukaan Sampel Geopolimer Perbesaran 100x (a) 105 μm ; (b) 90 μm ; (c) 75 μm ; (d) 63 μm	66
Gambar 4.10 Permukaan Sampel Geopolimer Perbesaran 1000x (a) 105 μm ; (b) 90 μm ; (c) 75 μm ; (d) 63 μm	67
Gambar 4.11 Permukaan Sampel Geopolimer Perbesaran 4000x (a) 105 μm ; (b) 90 μm ; (c) 75 μm ; (d) 63 μm	68
Gambar 4.12. Skema Reaksi Aktivasi Alkali Aluminosilikat	75

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Komposisi Kimia Terak (% Berat)	9
Tabel 2.2 Aplikasi Bahan Geopolimerik Berdasarkan Rasio Atom Silika dan Alumina	24
Tabel 2.3 Aplikasi Geopolimer	24
Tabel 2.4 Syarat-syarat Fisik <i>facing brick</i> dan <i>loadbearing concrete</i>	25
Tabel 2.5 Perbandingan Karakteristik Fisik antara Binder OPC (<i>Ordinary Portland Cement</i>), MPCs (<i>Magnesium Phosphat Cements</i>), dan Geopolimer	25
Tabel 2.6 Syarat Kimia Utama Semen Portland	32
Tabel 2.7 Syarat Kimia Tambahan Semen Portland ^{a)}	33
Tabel 2.8 Syarat Fisika Utama Semen Portland.....	33
Tabel 2.9 Syarat Fisika Tambahan Semen Portland ^{a)}	34
Tabel 3.1 Rancangan Percobaan Pembuatan dan Pengujian Geopolimer Semen Terak Fe-Ni.....	45
Tabel 4.1 Unsur-unsur yang Terkandung dalam Terak FeNi % Berat	60
Tabel 4.2 Komposisi Oksida Terak FeNi.....	60
Tabel 4.3 Spektra FTIR Terak FeNi dan Geopolimer Semen.....	69

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

Pada bab ini membahas tentang hal yang melatarbelakangi penelitian tentang geopolimer semen terak Fe-Ni, rumusan masalah, tujuan dan manfaat yang akan diperoleh dari penelitian ini.

1.1 Latar Belakang Masalah

Berdasarkan Undang-Undang Minerba No. 4/2009 tentang pertambangan mineral dan batubara yang mengamanatkan agar segera dilakukan pembangunan industri pengolahan bahan mineral. Undang-undang tersebut mulai berlaku 5 tahun semenjak disahkan yaitu pada tahun 2014. Pada saat ini terdapat 29 *smelter* nikel yang terdiri dari 9 *smelter* (yang menunjukkan 6-10%), 10 *smelter* (yang menunjukkan 11-30%), 9 *smelter* (yang menunjukkan 31-50%), dan 1 *smelter* (yang menunjukkan 81-100%) (Kementerian ESDM). Masing masing *smelter* tersebut nantinya akan menghasilkan ribuan ton nikel *pig iron* setiap tahunnya dan ribuan ton terak. Pembuangan terak dengan jumlah yang besar ini dapat menghasilkan masalah ruang dan lingkungan. Terak yang diproduksi dari peleburan non-ferrous biasanya mengandung logam yang bernilai (Co, Ni, Cu) yang dapat diambil lagi dengan melalui perlakuan kepada material terbuang tersebut dengan cara pirometalurgi, hidrometalurgi atau campuran keduanya (Ahmed dkk, 2000; Gorai dkk, 2003).

Terak *non-ferrous* yang masih mengandung logam atau yang tidak mengandung logam dapat dimanfaatkan untuk berbagai penggunaan seperti alat gosok, jalan, beton, alat potong, agregat aspal (Gorai dkk, 2003). Pengembangan pemanfaatan lain dari terak *non-ferrous* adalah sebagai material geopolimer. Pengembangan terak nikel sebagai geopolimer semen telah menjadi topik yang menarik hal ini dikarenakan banyaknya sumber daya dan lebih ramah terhadap lingkungan. Produksi semen portland menghasilkan 1 ton CO₂ setiap 1 ton semen portland yang dihasilkan. Peningkatan produksi semen dari tahun ke tahun akan berdampak meningkatnya gas rumah kaca yang dapat merusak lingkungan.

Pemanfaatan sebagai geopolimer semen dapat memberikan alternatif keberlangsungan lingkungan berupa pengurangan emisi CO₂, kebutuhan energi dan potensi pengurangan pemanasan global (Ng dkk, 2012).

Geopolimer adalah polimer anorganik yang memiliki sifat fisik, kimia dan mekanik yang sangat baik seperti kekuatan tekan dan lentur yang tinggi, kekerasan permukaan yang tinggi, porositas mikro-nano, kemampuan menyerap dan melewatkan air yang rendah, shrinkage yang dapat diabaikan, stabilitas panas, api dan ketahanan kimiawi. Geopolimerisasi melibatkan reaksi kimia antara material padat aluminosilikat dan larutan alkali logam silikat pada kondisi alkali yang tinggi. Reaksi dilakukan pada tekanan atmosfer dan temperatur dibawah 100°C menghasilkan struktur polimerik amorfus semi kristal, yang terdiri dari ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al (Davidovits 1999).

Mekanisme reaksi geopolimerisasi terdiri dari 4 tahap (Van Jaarsveld dkk, 2002; Swanepoel dkk, 2002; Panias dkk, 2007) yaitu:

- (i) Terlarutnya Si dan Al ke dari padatan Aluminosilikat ke dalam larutan alkali kuat.
- (ii) Pembentukan oligomer (geopolimer precursor) yang terdiri atas ikatan polimerik tipe Si-O-Si dan atau Si-O-Al.
- (iii) Polikondensasi oligomer ke bentuk rangka aluminosilikat (rangka geopolimerik).
- (iv) Partikel padatan yang tidak terlarut berikatan ke dalam rangka geopolimerik dan pengerasan pada keseluruhan sistem menjadi stuktur padatan geopolimer.

Penelitian geopolimer berbasis terak telah banyak dilakukan seperti sintesis geopolimer berbasis terak feronikel (Fe-Ni) (Maragkos, 2008), geopolimerisasi dengan media aktivasi udara dan CO₂ (Kalinkin, 2012), pengaruh anion nitrat dan sulfat pada immobilisasi logam berat dalam geopolimer terak Fe-Ni (Komnitsas, 2012) dan geopolimer berbasis terak Fe-Ni yang mengandung magnesium tinggi (Yang, 2014).

Terak Fe-Ni yang berupa bongkahan terlebih dahulu harus dihaluskan sampai ukuran tertentu agar dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan geopolimer. Ukuran partikel yang digunakan mempengaruhi kemampuan terak

Fe-Ni dalam bereaksi dengan larutan aktivator membentuk suatu produk geopolimer. Pengaruh ukuran partikel Terak Fe-Ni terhadap sifat fisik-mekanik geopolimer yang dihasilkan menjadi perhatian di dalam penelitian ini. Dikarenakan belum adanya penelitian sebelumnya yang mengamati pengaruh ukuran partikel terhadap sifat fisik-mekanik geopolimer yang dihasilkan. Pengembangan sifat fisik-mekanik dari terak Fe-Ni yang diolah menjadi material geopolimer menjadikannya dapat dimanfaatkan pada bidang konstruksi bangunan beton sebagai bahan pengikat dan penguat beton.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang terdapat dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh ukuran partikel terhadap sifat fisik-mekanik geopolimer semen berbasis terak Fe-Ni?
2. Bagaimana mikrostruktur dari geopolimer terak Fe-Ni berdasarkan perbedaan ukuran partikel?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini agar penelitian yang dilakukan lebih terarah adalah sebagai berikut:

1. Sampel terak Fe-Ni yang digunakan berasal dari tempat yang sama dan memiliki komposisi yang dianggap sama.
2. Kelembapan dan temperatur dianggap konstan.
3. Ukuran partikel dianggap seragam untuk masing-masing level.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisa pengaruh ukuran partikel terhadap sifat fisik-mekanik geopolimer semen berbasis terak Fe-Ni.
2. Menganalisa mikrostruktur dari geopolimer terak Fe-Ni berdasarkan ukuran partikel.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini diharapkan geopolimer semen terak Fe-Ni dapat menjadi pengganti material alam dan mengurangi limbah peleburan logam yang dapat merusak lingkungan.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada Bab ini dibahas tentang kajian pustaka berupa penelitian sebelumnya tentang pemanfaatan terak Fe-Ni, material geopolimer dan dasar teori yang melandasi penelitian ini.

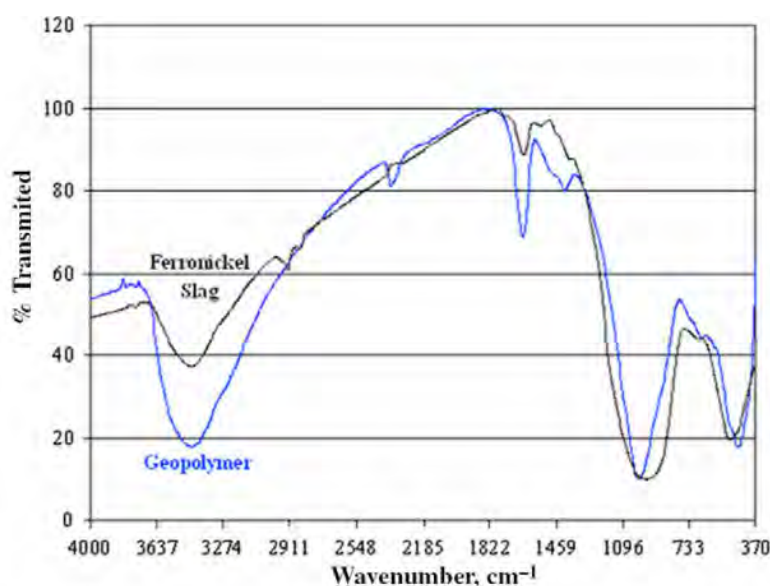
2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian tentang pemanfaatan terak *ferrous* dan *non ferrous* telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Terak nikel dimanfaatkan sebagai agregat dan campuran semen (Sugiri, 2005), agregat pada campuran aspal panas (Wang, 2011), terak baja sebagai agregat kasar (Wang, 2010). Selain sebagai agregat terak juga dimanfaatkan sebagai produk geopolimer. Beberapa penelitian yang terkait dengan geopolimer yaitu, sintesis geopolimer berbahan terak Fe-Ni (Maragkos, 2008), geopolimer terak nikel tinggi magnesium (Yang, 2014a), geopolimer abu terbang (Sinha, 2014), geopolimer fly ash rendah kalsium (Hardjito, 2005), ketahanan kimia geopolimer beton berbahan abu terbang (Tomkins, 2011), ketahanan geopolimer dalam kondisi lingkungan ekstrim (Sanni, 2012), pengurangan racun logam berat menggunakan geopolimer terak Fe-Ni (Komnitsas, 2012), geopolimer berbahan terak Cu-Ni yang diaktifkan pada atmosfer udara dan CO₂ (Kalinkin, 2012). Abu terbang sebagai beton geopolimer (Rangan, 2014).

Maragkos dkk (2008), meneliti tentang pembuatan geopolimer menggunakan terak Fe-Ni yang telah dihaluskan sampai ukuran 80 μm dan densitas 3090 kg/m³. Geopolimer pasta dicetak dengan cetakan kubus ukuran 50x50x50 mm yang selanjutnya dioven selama 48 jam pada suhu 60°C. Berdasarkan pengujian yang dilakukan disimpulkan bahwa S/L ratio merupakan parameter yang penting untuk kekuatan tekan pada terak basis geopolimer. Untuk geopolimer berbahan terak Fe-Ni batas nilai S/L ratio adalah 5,4 g/mL. Kekuatan tekan pada produk geopolimer terbukti meningkat secara fungsi linier pada penambahan konsentrasi silika pada larutan. Kondisi optimum untuk sintesis

geopolimer terak Fe-Ni secara eksperimen ditentukan dengan S/L ratio 5,4 g/mL, konsentrasi NaOH pada larutan 7 M dan konsentrasi SiO₂ dalam larutan adalah 4 M. Produk geopolimer dengan kondisi optimum menampilkan kekuatan tekan sebesar 120 MPa, kapasitas penyerapan air 0,7% dan kerapatan 2480 kg/m³.

Berdasarkan pengujian XRD senyawa yang terkandung didalam terak dan geopolimer berupa *ferrite-spinel* [(Fe²⁺, Mg)(Al, Cr, Fe³⁺)₂O₄]. Selanjutnya dilakukan uji FTIR pada terak Fe-Ni dan produk geopolimer dianalisa untuk mengetahui gugus fungsi senyawa yang berada pada terak dan geopolimer dapat dilihat pada Gambar 2.1. Pita serapan yang penting pertama berada pada daerah panjang gelombang lebih dari 1600 cm⁻¹ yaitu pada 3445 cm⁻¹ (*streaching*) dan 1640 cm⁻¹ (*bending*) yang merupakan pita vibrasi dari molekul air. Pada produk geopolimer memiliki serapan yang lebih besar menandakan tingginya kandungan ikatan air pada material.

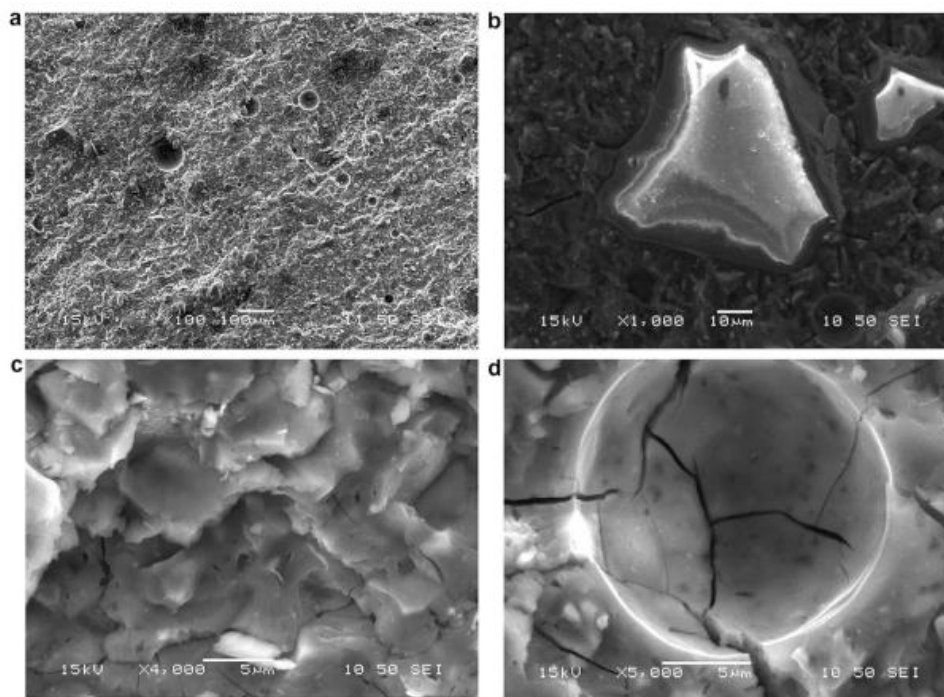


Gambar 2.1. Spektra FTIR Terak dan Geopolimer ([NaOH]=7 M; [SiO₂]= 4 M; S/L=5,4 g/mL; temperatur *curing* 60°C (Maragos dkk, 2009).

Daerah kedua yang penting berada pada 1300 cm⁻¹ dan 1600 cm⁻¹, dimana untuk geopolimer pada panjang gelombang 1411 cm⁻¹ menampilkan vibrasi *streaching* O-C-O. Serapan pada panjang gelombang ini menandakan adanya karbonat pada geopolimer. Daerah ketiga yang penting berada pada

panjang gelombang kurang dari 1300 cm^{-1} yang mencakup pita absorpsi vibrasi asimetris *stretching* Si-O-Si ($970\text{-}1090\text{ cm}^{-1}$), vibrasi simetris *stretching* Si-O-Si dan Al-O-Si ($550\text{-}750\text{ cm}^{-1}$) dan vibrasi *bending* Si-O-Si dan O-Si-O ($460\text{-}510\text{ cm}^{-1}$). Pita absorpsi terakhir pada panjang gelombang 663 cm^{-1} yang berhubungan dengan penggabungan tetrahedral aluminum didalam aluminosilikat yang menampilkan pembentukan fase amorfus zeolitik selama geopolimerisasi.

Gambaran mikrostruktur pada produk geopolimer dapat dilihat pada Gambar 2.2. Gambar mikroskopis SEM menampilkan permukaan patahan pada produk geopolimer setelah dilakukan pengujian tekan. Material geopolimer terlihat kompak dan kohesif dengan tidak ada *discontinuities* (Gambar 2.2a). Tidak terdapat pori yang terlihat pada permukaan sampel. Rongga berbentuk bulat dengan ukuran berbeda $15\text{-}70\text{ }\mu\text{m}$ menunjukkan adanya gelembung udara yang terperangkap selama proses pencetakan yang diakibatkan oleh viskositas alami dari pasta geopolimer (Gambar 2.2a-d).



Gambar 2.2 Foto SEM pada Produk Geopolimer Berbahan Terak Fe-Ni, (a) Makrostruktur Perbesaran 100x, (b) Mikrostruktur Perbesaran 1000x, (c) Mikrostruktur Perbesaran 4000x, (d) Mikrostruktur Perbesaran 5000x (Maragos dkk, 2009).

Antarmuka yang terdiri dari partikel terak yang tidak terlarut dan pengikat yang *amorfus* memiliki daerah yang paling sensitif pada geopolimer selama pengujian tekan. Kekuatan mekanik pada pengikat yang *amorfus* lebih rendah daripada partikel yang tidak terlarut dalam pembentukan retakan didalam matrix *gelatinous* pada material.

2.2 Terak

2.2.1 Pengertian Terak

Terak merupakan campuran lelehan logam oksida dan silikat. Terak terbentuk dari peleburan logam yang diekstraksi dari bijih yang mengandung beberapa mineral seperti SiO_2 , MgO , dan Al_2O_3 . Terak juga terbentuk dalam *matte converting* atau didalam penyulingan logam mentah, dimana terak menyerap oksida-oksida pengotor seperti P_2O_5 , MnO , atau SiO_2 . Terak dapat menyerap sulfida (dari desulfurisasi baja) (Vignes, 2011).

Terak merupakan sisa hasil peleburan mineral *ferrous* atau *non-ferrous* di dalam *blast furnace*. Terak berupa lelehan campuran logam oksida dan silikon oksida. Proses peleburan mineral *ferrous* dan *non ferrous* menghasilkan terak yang berbeda-beda. Terak dapat dikatakan sebagai limbah padat yang masih banyak mengandung unsur mineral (Syarif, 2010).

Terak pada *electric arc furnace* mewakili 80-90% material *input*. Sebagai hasilnya, sangat banyak terak dihasilkan di dalam produksi Fe-Ni yang merupakan masalah serius di Dunia. Di Yunani, kira-kira 2 juta ton terak Fe-Ni tiap tahun diproduksi (Kirillidi dkk, 2005). Terak Fe-Ni merupakan hasil sampingan industri yang dihasilkan selama pemurnian Fe-Ni dari bijih nikel dan peleburan material seperti pada pembuatan baja dan paduan nikel. Terak Fe-Ni mengandung beberapa unsur utama seperti SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , Cr_2O_3 dan beberapa unsur lainnya dengan komposisi yang berbeda-beda.

Produksi terak Fe-Ni dari laterit mengikuti jalur pirometalurgi yang termasuk ke dalam 3 tahapan:

- (i) Pra reduksi di dalam *rotary kilns*.
- (ii) *Reduktif smelting* di dalam *electric arc furnace* dan.

- (iii) *Fe-Ni enrichment-refining* di dalam konverter. Selama *reduktif smelting*, dua phase terpisah terbentuk di dalam *electric arc furnace* yaitu logam yang merupakan paduan Fe-Ni dan terak yang mengandung oksida.

2.2.2 Komposisi Terak

Terak selalu kontak dengan fase *second liquid* seperti logam atau *matte*. Terak dapat dipisahkan dengan mudah dari fase keduanya pada akhir operasi. Terak pada akhir fase ekstraksi harus memiliki visikositas dan kerapatan yang rendah juga masih berbentuk fluida dalam rentang temperatur yang luas. Viskositas terak tergantung pada temperatur dan komposisi terak terutama pada panjang rantai aluminosilikat dan juga pada *basicity* terak.

Terak secara metalurgi dibedakan dalam dua grup yaitu terak dari produksi besi dan terak dari produksi logam non besi. Komposisi kimia dari terak dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Terak (% Berat)

Komponen	Terak <i>Granulated blast furnace</i> dari beberapa pabrik				Terak Lainnya			
	"Sendzimir"	"Pokoj" ^a	"Kosciuszko"	"Katwice"		Nickel	Tembaga 1	Tembaga 2
SiO ₂	40,6	37,2	34,8	40,0		65,8	43,9	39,0
Fe ₂ O ₃	0,3	0,4	0,6	1,7		3,2	4,1	3,6
Al ₂ O ₃	6,3	9,0	8,4	7,6		4,7	14,8	12,8
CaO	40,9	42,8	39,5	41,0		5,2	19,6	19,0
MgO	7,5	6,0	7,8	7,0		12,5	9,6	10,0
Lain-lain	4,4	4,6	5,3	2,7	FeO	2,0	0,9	5,0
Z ^b	1,35	1,55	1,45	1,39	SO ₃	0,3	0,5	0,2
					S		0,2	0,1
G ^c	0,15	0,24	0,22	0,19	MnO	0,2	0,1	0,1
					Na ₂ O	0,2	0,7	0,8
Glass ^d	87	6,8	86	98	CuO	-	1,3	4,9
					L.o.i	4,9	-	-
					K ₂ O	0,2	3,1	2,8

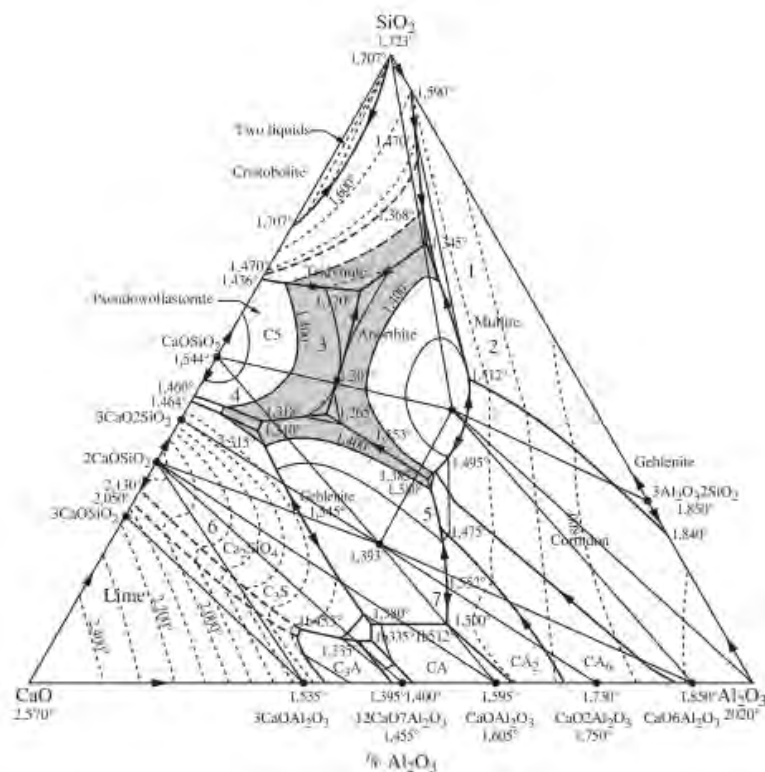
^aPabrik yang sudah ditutup; ^bZ= (CaO + MgO + Al₂O₃)/SiO₂; ^cG= Al₂O₃/SiO₂; ^d% volume
Sumber: Kurdowski (2014)

2.2.3 Diagram Fase Terak

Diagram fase (*binary*, *ternary*, atau *pseudo-ternary*) oksida terdapat dalam jumlah yang besar dalam keadaan padat, dan fase cair sering menampilkan bagian kecil oksida. Perbedaan model terak telah dikembangkan dalam rangka untuk mengevaluasi fisikal (viskositas) dan sifat termodinamik (diagram fase dan aktivitas) pada terak kompleks. Terdapat dua tipe yang berbeda dari terak, terak dengan oksida yang sulit direduksi (CaO , MgO , SiO_2 dan Al_2O_3); dan terak dengan oksida mudah direduksi dengan beberapa keadaan oksidasi ($\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO-Mn}_3\text{O}_4/\text{CrO-Cr}_2\text{O}_3$) (Vignes, 2011).

2.2.3.1 Sistem $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

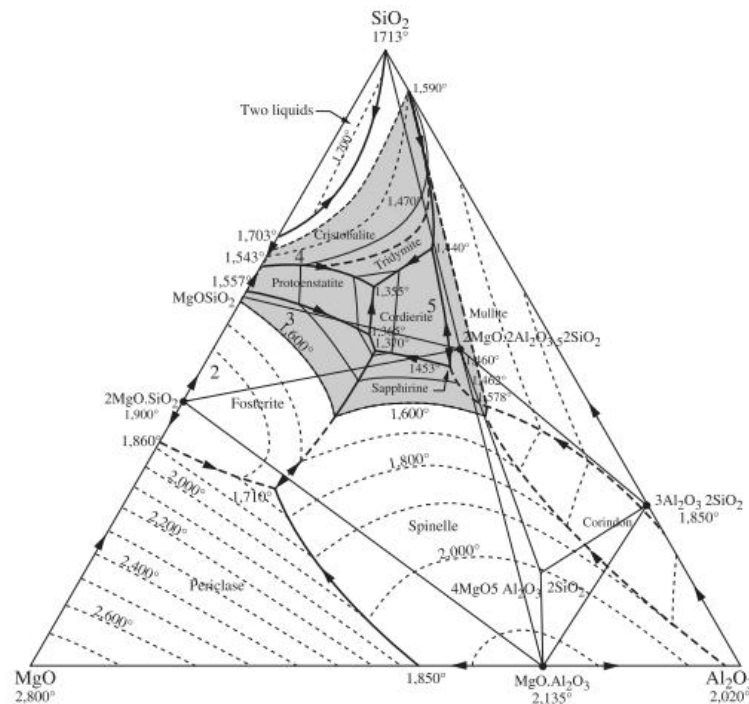
Sistem *ternary* merupakan dasar dari banyak metalurgi terak, diagram fase dengan *liquidus valley* dan *liquidus isotherms* menandakan area fase cair pada temperatur yang sama. Area fase cair yang kecil pada 1.400°C dan relatif besar pada 1.600°C dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sistem $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ (Vignes, 2011).

2.2.3.2 Sistem MgO-SiO₂-Al₂O₃

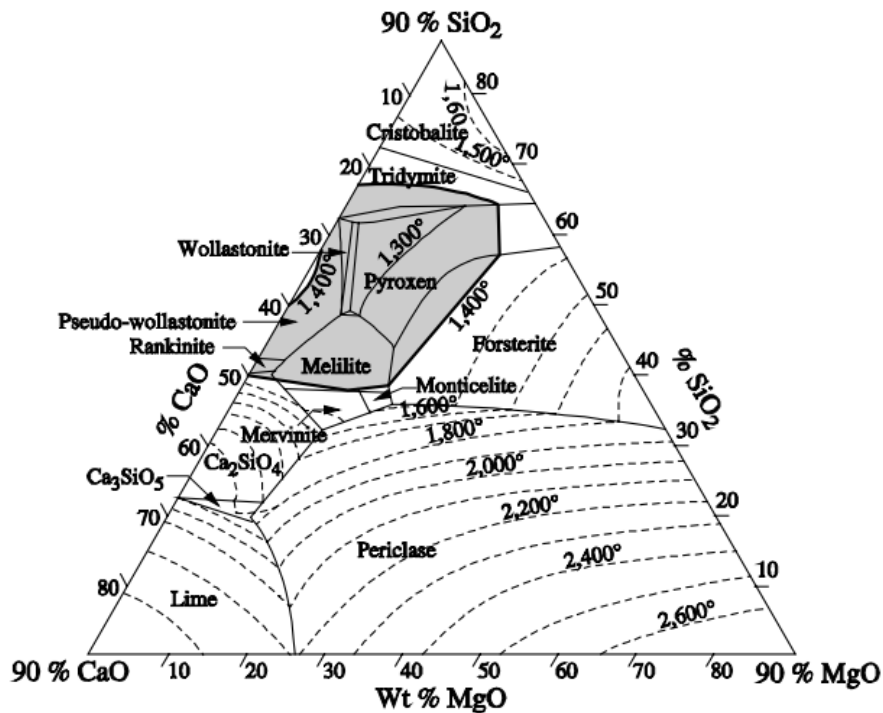
Sistem MgO-SiO₂-Al₂O₃ merupakan *base* terak pada peleburan reduksi bijih ferrochrome didalam *electric furnace*. Fase *liquid* dengan area kecil pada 1.600°C dibandingkan untuk area pada sistem sebelumnya (Gambar 2.4). Komposisi dasar terak adalah: SiO₂ (40%), MgO (35%), Al₂O₃ (15%) dan CaO (10%) dalam persen molar.



Gambar 2.4 Sistem MgO-SiO₂-Al₂O₃, diagram fase (*projection*) *continuous lines*: *lembah*, *broken lines*: *liquidus isotherms* (Vignes, 2011).

2.2.3.3 Sistem CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃

Terak sistem *quarternary* CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃, diagram *pseudoternary* CaO-SiO₂-MgO untuk Al₂O₃ 10% (Gambar. 2.5). Terak *blast furnace* memiliki komposisi rata-rata: CaO (42,5%), SiO₂ (35,5%), Al₂O₃ (10,5%) dan MgO (7,5%). Terak menyerap oksida stabil (*non-reducible* melalui karbon monoksida pada temperatur ini) yang datang dari *gangue* bijih dan debu pembakaran pada kokas. Terak telah menjadi cair pada temperatur penuangan logam panas pada 1.400°C. Area fase cair terak pada temperatur ini relatif kecil. Viskositasnya sekitar 100x lebih tinggi daripada viskositas logam panas.



Gambar 2.5 Diagram Fase Sistem $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ (10%): *lembah-thin continuous lines*; *liquidus isotherms-broken lines*; *shadowed area-liquid blast furnace terak* pada 1.400°C (Vignes, 2011).

2.3 Geopolimer

2.3.1 Pengertian Geopolimer

Cairan alkali yang digunakan untuk bereaksi dengan silikon (Si) dan Aluminium (Al) dari material geologi alami atau bahan sampingan material seperti *fly ash*, terak *blast furnace* dan abu sekam padi untuk menghasilkan suatu zat pengikat (Davidovits, 2008). Karena reaksi kimia yang terjadi dalam hal ini adalah geopolimerisasi maka disebutlah geopolimer untuk mewakili zat pengikat tersebut.

Geopolimer adalah struktur kerangka yang dibentuk oleh kondensasi unit tetrahedral aluminosilikat dengan ion logam alkali. Geopolimer disintesis dari dua bagian campuran yang mengandung larutan alkali dan padatan aluminosilikat. Geopolimer terjadi pada temperatur ruang atau pada temperatur yang dinaikkan (Feng, 2012). Unit yang utama dalam struktur geopolimer adalah kompleks tetrahedral yang terdiri dari Si atau Al yang terkoordinasi dengan ikatan kovalen 4 atom oksigen.

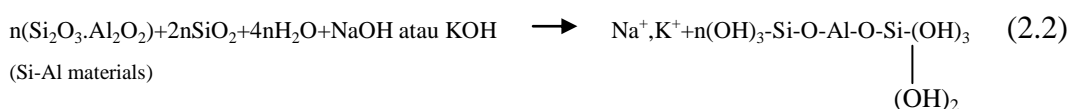
2.3.2 Reaksi Geopolimer

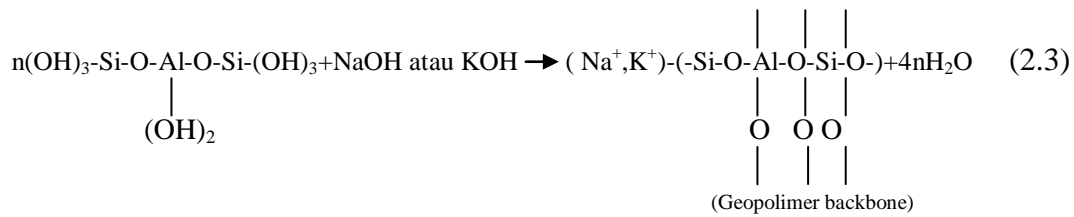
$$M_n [-(SiO_2)_z-AlO_2]_n \cdot wH_2O \quad (2.1)$$

M = unsur alkali atau kation seperti potasium, sodium, atau kalsium;

n = derajat polikondensasi atau polimerisasi;

Skema pembentukan material geopolimer dijelaskan oleh persamaan (2.2) dan (2.3) (Van Jaarsveld dkk, 1997; Davidovits, 1999):





Reaksi kimia terdiri dari beberapa tahapan (Davidovits, 1999; Xu, 2000):

- (i) Terputusnya atom Si dan Al dari material sumber karena kekuatan ion hidrogen.
- (ii) Transportasi atau orientasi atau kondensasi pada ion pendahuluan kedalam monomer.
- (iii) Ikatan atau polikondensasi/polimerisasi pada monomer ke dalam struktur polimer

Masing-masing dari 3 tahapan tersebut dapat *overlap* dengan yang lainnya dan terjadi hampir bersamaan, jadi sulit untuk mengisolasi atau menjelaskan tiap tahap secara terpisah (Palomo dkk, 1999).

Persamaan 2.3 menyatakan bahwa air dilepaskan selama reaksi kimia yang terjadi dalam pembentukan geopolimer. Air ini dilepaskan dari matrix geopolimer selama *curing* dan lebih lanjut selama periode pengeringan, yang berada pada nano pori diskontinu dalam matrix, yang mana memberikan manfaat pada kinerja geopolimer. Air di dalam campuran geopolimer tidak berperan dalam reaksi kimia, hanya untuk memberikan kemampuan kerja pada campuran selama pengerjaan. Hal ini berbeda untuk reaksi kimia pada air di campuran semen portland selama proses hidrasi.

Air yang dilepaskan dari matriks geopolimer selama periode *curing* dan pengeringan lebih lanjut, meninggalkan matriks nano berpori, yang memberikan manfaat bagi kinerja geopolimer. Air dalam campuran geopolimer berbasis abu rendah kalsium, tidak memainkan peran langsung dalam reaksi kimia yang terjadi. Hal ini berbeda dengan reaksi kimia dari air dalam campuran beton semen Portland selama proses hidrasi. Sebagian kecil sumber bahan-bahan yang kaya kalsium seperti terak dapat dimasukkan dalam bahan sumber untuk mempercepat pengaturan waktu dan mengubah cara *curing* untuk campuran geopolimer. Dalam

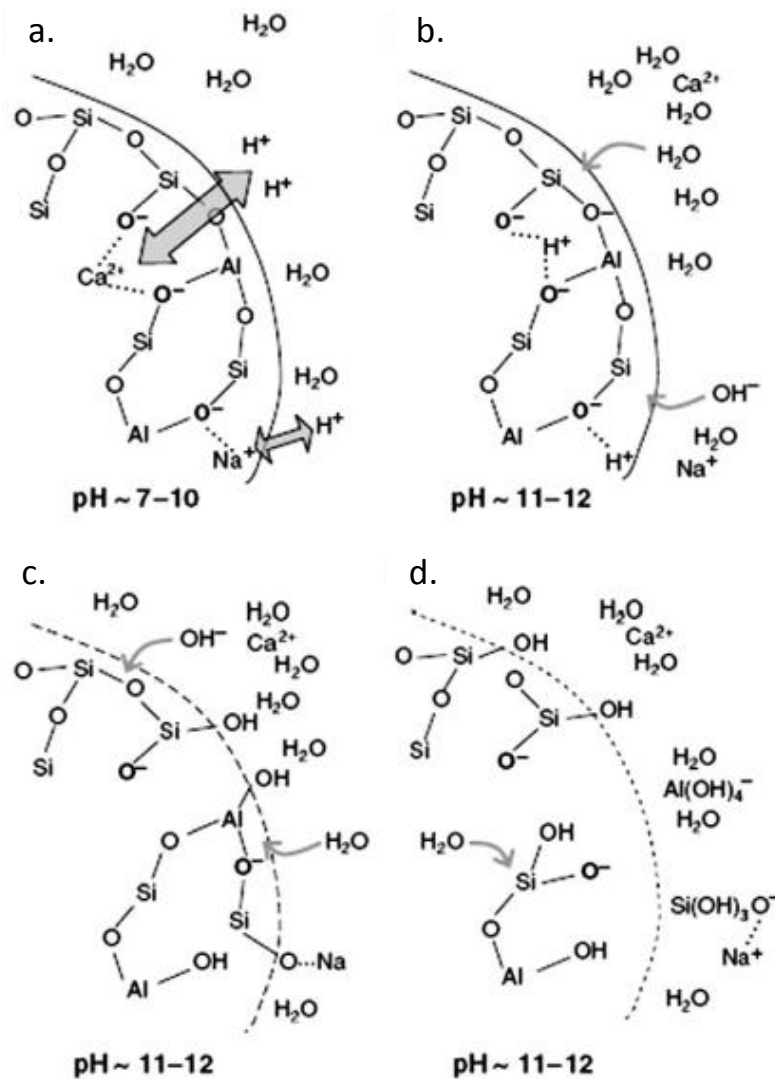
situasi itu, air yang dilepaskan selama geopolimerisasi bereaksi dengan kalsium ini untuk menghasilkan produk hidrasi.

Geopolimer dapat membentuk satu dari 3 bentuk dasar (Davidovits, 1999):

- Poli (sialat), yang memiliki unit berulang $[-\text{Si-O-Al-O-}]$.
- Poli (sialat-siloxo), yang memiliki unit berulang $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-}]$.
- Poli (sialat-disiloxo), yang memiliki unit berulang $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-}]$.

Sialat adalah singkatan dari silikon-oxo-aluminat.

Geopolimer dibentuk melalui reaksi antara material sumber Al-Si dan larutan aktivator basa. Terak merupakan salah satu material sumber Al-Si. Mekanisme reaksi *ground granulated blast furnace slag (GGBFS)* berhubungan dengan reaksi yang kompleks yang tersusun dari beberapa tahapan, termasuk *initial destruction* pada GGBFS dan selanjutnya polikondensasi pada produk reaksi. Berdasarkan fase *glass* yang mengandung Ca tinggi dan Al rendah, Gambar 2.6 menunjukkan mekanisme pembubaran (*dissolution*) *glass* yang mengandung monovalen dan divalen jaring kation yang termodifikasi. Pada Gambar 2.6a terjadi pergantian atom Ca^{2+} dan Na^+ oleh atom H^+ . Kemudian terjadi reaksi hidrolisis ikatan Al-O-Si yang mengakibatkan terjadinya peningkatan pH (2.6b). Pada tahap selanjutnya (2.6c) terjadi depolimerisasi jaringan *glass* dan pada tahap akhir (2.6d) terjadi pelepasan Si dan Al. Keseluruhan struktur Si dan Al merupakan tetrahedral yang terkoordinasi dengan oksigen. Perbedaan utama antara bagian Ca^{2+} dan Na^+ adalah kerusakan struktur *glass* lebih tinggi pada pelepasan kation valensi 2 dibandingkan dengan kation valensi 1.



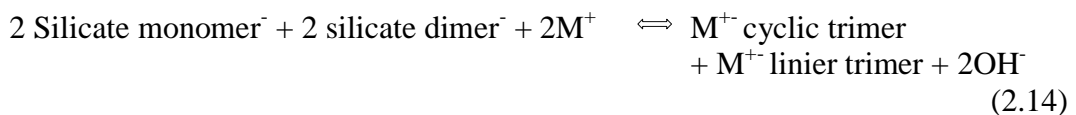
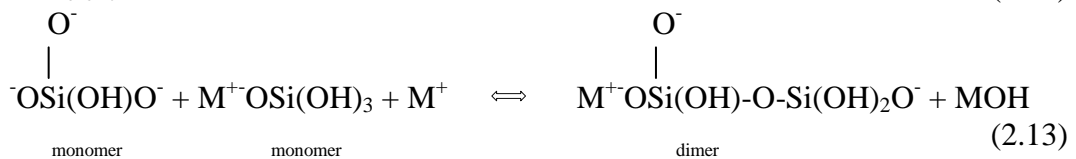
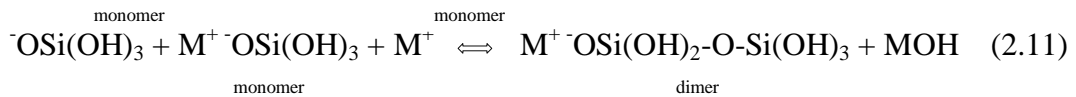
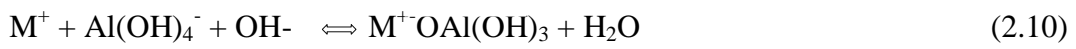
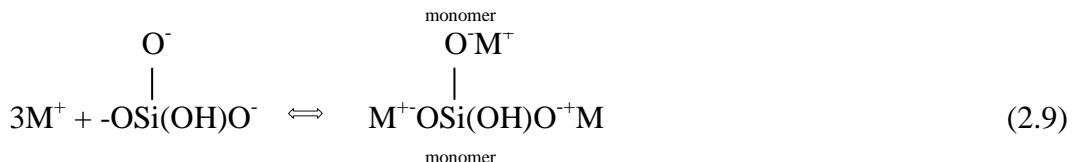
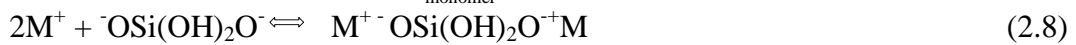
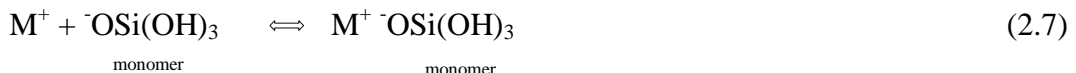
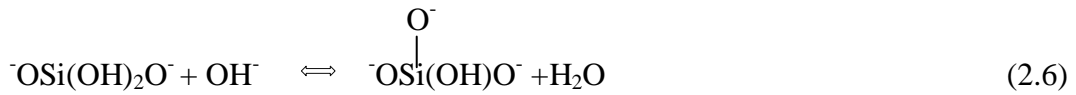
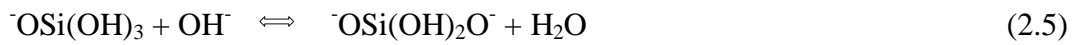
Gambar 2.6 Mekanisme Pemutusan *Glass* Aluminosilikat pada Tahap Awal Reaksi Geopolimerisasi (Duxson, 2008)

Krizan dan Zivanovic didalam Li dkk (2010) menganalisa pelepasan panas pada GGBFS yang diaktivasi larutan alkali dan mencatat bahwa modulus Na₂O dan silika yang lebih tinggi memiliki hubungan dengan peningkatan hidrasi. Proses geopolimerisasi pada GGBFS dimulai dengan pemutusan ikatan Ca-O, Mg-O, Si-O-Si, Al-O-Al, Al-O-Si di dalam terak. Selanjutnya terbentuknya lapisan Si-Al pada permukaan butir terak dan pada akhirnya membentuk produk yang telah terhidrasi.

Mekanisme reaksi GGBFS yang diaktivasi oleh larutan alkali akan lebih rumit dengan keberadaan atom Ca yang cukup banyak. Beberapa penelitian

menemukan bahwa atom Ca memiliki pengaruh positif terhadap kekuatan geopolimer binder. Selain itu keberadaan Al juga berperan penting, laju reaksi dan pelepasan Al selama reaksi geopolimerisasi tidak hanya mempengaruhi kekuatan produk tetapi juga tingkat kekerasan, kekuatan tekuk, ketahanan asam, mikrostruktur dan peningkatan kekuatan.

Kemungkinan proses kimia secara normal untuk kelarutan mineral Al-Si dan silikat pada kondisi alkali kuat dapat ditampilkan mengikuti skema reaksi (2.4-2.14) seperti dibawah ini, dimana M mewakili Na atau K (menurut Babushkin dan McCormick di dalam Xu, 2000).



Reaksi pelarutan (2.4) pada partikel merupakan fungsi konsentrasi MOH, struktur dan permukaan pada mineral. Skema reaksi ini hanya menampilkan pengaruh konsentrasi MOH. Dari 11 reaksi (2.4-2.14) yang ditampilkan diatas, dapat dilihat bahwa peningkatan konsentrasi larutan alkali mempengaruhi keseluruhan reaksi (2.4) sampai (2.10) bergeser ke sebelah kanan. Persamaan (2.4)-(2.6) merupakan reaksi hidrasi kimia, dimana anion OH^- bereaksi dengan permukaan padat Al-Si untuk membentuk $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $^-\text{OSi}(\text{OH})_3$, *divalent orthosilicic acid* dan *trivalent aorthosilicic acid ion*. Reaksi (2.7) sampai (2.10) merupakan reaksi fisika elektrostatis, dimana kation logam alkali M^+ bereaksi dengan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $^-\text{OSi}(\text{OH})_3$, *divalent orthosilicic acid* dan *trivalent orthosilicic acid ions* untuk mengimbangi gaya tolak elektrostatis Coulomb.

Reaksi (2.11) sampai (2.14) merupakan interaksi kondensasi pasangan kation-anion berdasarkan pada gaya tarik elektrostatis Coulomb. Pada reaksi (2.10) sampai (2.14), kation M^+ bereaksi dengan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ dan *orthosilicic acid ions* untuk membentuk pasangan ion pada monomer $\text{M}^+\text{Al}(\text{OH})_4$ dan monomer silikat, ion dimer dan trimer, dimana mengurangi jumlah $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ bebas dan *orthosilicic acid ions*, oleh karena itu pergeseran reaksi (2.4) sampai (2.6) ke sebelah kanan.

Reaksi (2.7) sampai (2.14) menyarankan bahwa kation logam alkali mempengaruhi penyebaran kelarutan pada alumino-silikat. Na^+ dan K^+ memiliki *electric charge* yang sama, perbedaan ukuran ion menghasilkan perbedaan pengaruh keduanya. Interaksi pasangan kation-anion menurun secara signifikan ketika ukuran kation meningkat. Kation dengan ukuran yang paling kecil menyokong reaksi pasangan ion dengan oligomer silikat yang paling kecil, seperti monomer, dimer, trimer. Dengan demikian dapat diperkirakan bahwa Na^+ dengan ukuran paling kecil akan menjadi lebih aktif didalam reaksi (2.7) sampai (2.14) dibandingkan dengan K^+ , yang mana menghasilkan kelarutan mineral yang lebih tinggi didalam larutan NaOH.

2.3.3 Larutan Aktivator

2.3.3.1 Natrium Hidroksida (NaOH) dan Kalium Hidroksida (KOH)

Natrium hidroksida (NaOH) biasa dikenal dengan nama soda api merupakan suatu senyawa organik berwarna putih dengan komponen berupa logam yang sangat membakar dan garam alkali yang dapat berupa pelet, granular dan larutan dengan perbedaan konsentrasi. NaOH terlarut didalam air, etanol dan metanol. Pelarutan padatan NaOH kedalam air bereaksi secara eksotermik dan melepaskan panas yang cukup besar, larutan yang dihasilkan tidak berwarna dan tidak berbau.

Kalium hidroksida (KOH) dapat dihasilkan dalam bentuk murni dengan mereaksikan NaOH dan kalium yang tidak murni. KOH dipasaran berupa pelet tembus cahaya dan bereaksi secara eksotermik ketika dilarutkan kedalam air. Kelarutan KOH sebesar 121 g per 100 mL air sedangkan kelarutan NaOH 100 g per 100 mL air. KOH membentuk larutan alkali kuat pada air dan pelarut polar.

NaOH dan KOH merupakan basa kuat yang mudah larut dalam air dan dapat melepas ikatan hidroksil serta membentuk ion sempurna. Kedua jenis alkali ini mampu bereaksi membentuk garam karbonat jika bertemu dengan CO_2 dari udara. KOH memiliki kelarutan dalam air 1100 g/L dan mampu melarutkan Al_2O_3 dalam air membentuk AlO_2 . Selain itu larutan alkali juga mampu bereaksi dengan Fe_2O_3 membentuk endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang berwarna coklat kemerahan dan pada pH larutan yang semakin tinggi, larutan alkali juga mampu untuk melarutkan MnO .

Alkali hidroksida yang paling banyak digunakan dalam sintesis geopolimer adalah NaOH dan KOH. NaOH merupakan aktivator hidroksida yang paling umum digunakan dalam sintesis geopolimer dikarenakan harganya yang murah dan banyak tersedia. Penggunaan NaOH secara luas sebagai aktivator pada sintesis geopolimer abu terbang dan metakaolin dikarenakan biayanya yang rendah dan viskositas yang rendah. Penggunaan aktivator NaOH telah diketahui menunjukkan pembentukan struktur zeolit terutama pada periode *curing* yang lebih lama atau pada temperatur yang dinaikkan. Pembentukan struktur zeolit juga diketahui pada penggunaan KOH sebagai aktivator geopolimer. Kristalisasi sistem geopolimer KOH/metakaolin lebih rendah dibandingkan dengan sistem NaOH/metakaolin.

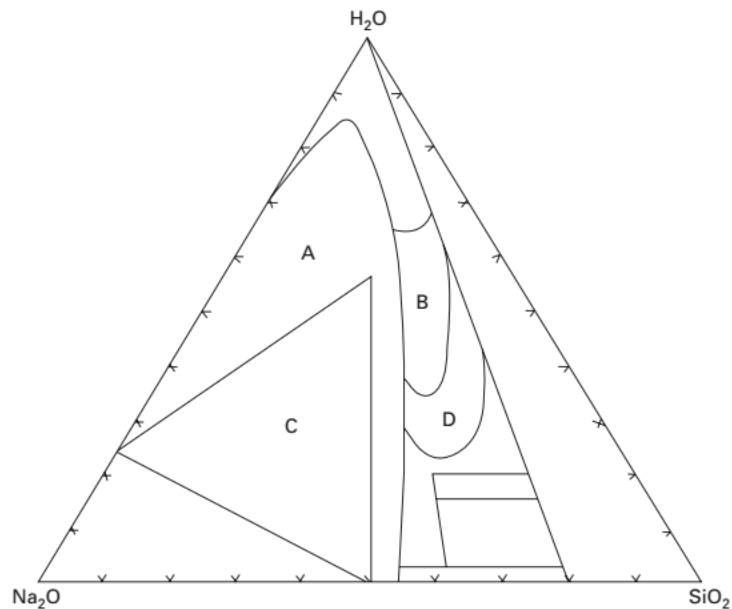
2.3.3.2 Natrium Silikat

Natrium silikat [$\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$] biasa disebut *waterglass* atau *liquid glass* merupakan bagian dari natrium metasilikat, Na_2SiO_3 . Natrium silikat biasa terdapat dalam bentuk padatan atau larutan. Natrium silikat digunakan dalam bidang semen, *passive fire protection*, dan *automobiles*. Natrium silikat dibentuk melalui reaksi antara lelehan natrium karbonat dan silikon dioksida ($<900^\circ\text{C}$ vs $>1600^\circ\text{C}$) seperti pada reaksi 2.15 dan 2.16.



Natrium silikat stabil dalam bentuk netral dan larutan alkali. Didalam larutan asam, ion silikat bereaksi dengan ion hidrogen membentuk asam silikat dan setelah dipanaskan atau dikeringkan membentuk silika gel. Natrium silikat sangat berguna sebagai pengikat. Natrium silikat dicampurkan dengan agregat dapat membuatnya menjadi keras, dapat digunakan sebagai insulator temperatur tinggi pada *refractories*.

Vail didalam Provis dkk (2009) menampilkan diagram sistem *ternary* $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ pada temperatur ruang. Diagram *ternary* tersebut menampilkan secara terpisah sifat dan penggunaan material berdasarkan komposisinya dapat dilihat pada Gambar 2.6. Bagian yang penting dalam sintesis geopolimer pada daerah A (campuran terpisah kristalin; banyak mengandung larutan pengaktivasi *low-silica* yang merupakan komposisi metastabil pada daerah ini) atau daerah B (larutan silikat yang umum). Daerah C merupakan daerah yang mudah mengalami kristalisasi seringkali sebagai *hydrated sodium metasilicates*. Daerah D memberikan viskositas yang tinggi.



Gambar 2.7 Ternary Diagram Sistem Na_2O - SiO_2 - H_2O (Vail didalam Provis dkk, 2009).

Tipe larutan alkali berperan penting dalam proses geopolimerisasi (Palomo, 1999). Reaksi terjadi pada laju yang tinggi ketika cairan alkali mengandung larutan silikat, natrium atau kalium silikat, dibandingkan dengan hanya menggunakan hidroksida alkali. Xu dkk (2000) menetapkan bahwa penambahan larutan natrium silikat seperti cairan alkali mempertinggi reaksi antara material sumber dan larutan. Selanjutnya setelah penyelidikan geopolimerisasi pada 16 mineral alami Al-Si, ditemukan bahwa secara umum larutan NaOH menyebabkan perluasan dissolution mineral yang lebih tinggi dibandingkan dengan larutan KOH .

2.3.4 Semen dan Beton Geopolimer

Dari segi istilah, geopolimer semen (Davidovits, 1991) adalah sistem pengikat yang mengeras pada suhu kamar, seperti semen Portland biasa. Jika senyawa geopolimer memerlukan pengaturan panas maka tidak dapat disebut geopolimer semen melainkan geopolimer pengikat.

Pembuatan semen geopolimer membutuhkan bahan silikat alumina, penggunaan reagen basa yang ramah (natrium atau kalium silikat terlarut dengan rasio molar $\text{Mr SiO}_2: \text{M}_2\text{O} > 1,65$, $\text{M} = \text{Na}$ atau K). Pengerasan suhu kamar

bergantung pada penambahan kation kalsium, bahan utama terak besi *blast furnace*. Geopolimer semen *curing* lebih cepat daripada semen portland. Namun, semen geopolimer dapat diatur cukup lambat sehingga mereka dapat dicampur dan diantarkan ke pencampur beton. Geopolimer semen ini juga memiliki kemampuan untuk membentuk ikatan kimia yang kuat dengan semua jenis agregat batu.

2.3.5 Kategori Geopolimer Semen

Kategori terdiri dari:

1. Geopolimer semen berbasis terak (Davidovits, 1985)
2. Geopolimer semen berbasis batuan (Gimeno, 2003)
3. Geopolimer semen berbasis abu terbang
 - a. Type 1: geopolimer abu terbang aktivasi alkali (Palomo, 1999)
 - b. Type 2: geopolimer semen berbasis terak/abu (Izquierdo, 2009)
4. Semen geopolimer berbasis ferro-sialat

2.3.6 Faktor yang Mempengaruhi Sifat Geopolimer

Beberapa faktor telah diidentifikasi sebagai parameter penting yang berpengaruh pada sifat geopolimer. Palomo dkk (1999) menyimpulkan bahwa temperatur curing telah mempercepat reaksi pada geopolimer berbasis abu terbang, dan berefek signifikan terhadap kekuatan mekanik, bersama dengan waktu *curing* dan tipe cairan alkali. Temperatur *curing* yang lebih tinggi dan waktu *curing* yang lebih lama ternyata menghasilkan kekuatan tekan yang lebih tinggi. Larutan alkali yang mengandung larutan silikat ternyata meningkatkan laju reaksi dibandingkan larutan alkali yang mengandung hidroksida.

Van Jaarsveld dkk (2002) menyimpulkan bahwa kandungan air, *curing* dan kondisi kalsining pada tanah liat kaolin berpengaruh pada sifat geopolimer. Mereka juga menyatakan *curing* pada temperatur yang terlalu tinggi menyebabkan retakan dan berefek negatif pada sifat material. Akhirnya, disarankan penggunaan temperatur *curing* yang lebih rendah untuk meningkatkan sifat fisik pada material. Pada penelitian yang lain, van Jaarsveld dkk (2003) menyatakan bahwa sumber

material menentukan sifat geopolimer, terutama kandungan CaO dan ratio air-abu terbang.

Berdasarkan penyelidikan statistik pengaruh parameter pada proses polimerisasi metakaolin berbasis geopolimer, Barbosa dkk (1999; 2000) melaporkan pentingnya komposisi molar oksida yang terdapat di dalam campuran dan kandungan air. Mereka juga menetapkan bahwa geopolimer menampilkan mikrostruktur amorf dan memperlihatkan densitas rendah 1.3 dan 1.9. Berdasarkan penyelidikan geopolimerisasi 16 mineral alami Si-Al, Xu dan van Devender (2000) melaporkan bahwa faktor seperti CaO, K₂O, ratio molar Si-Al di dalam material sumber, tipe cairan alkali, luas dissolution Si, dan ratio Si-Al dalam larutan secara signifikan berpengaruh pada kekuatan tekan geopolimer.

Palomo dkk (2004) melaporkan pembuatan geopolimer beton berbasis abu terbang jalan kereta api. Mereka menemukan bahwa stuktur geopolimer semen mudah untuk diproduksi menggunakan teknologi beton yang ada saat ini tanpa perubahan yang berarti. Performa teknik produk sangat baik dan *drying shrinkage* yang kecil.

2.3.7 Aplikasi Geopolimer

Bahan geopolimer memiliki berbagai aplikasi di bidang industri seperti industri mobil dan kedirgantaraan, pengecoran *non-ferrous* dan metalurgi, teknik sipil dan industri plastik (Davidovits, 2008). Jenis aplikasi bahan geopolimer tersebut ditentukan oleh struktur kimia dalam rasio atom Si:Al di *polysialate*. Davidovits (2008) mengklasifikasikan jenis aplikasi sesuai dengan rasio Si:Al seperti yang disajikan pada Tabel 2.2 rendahnya rasio Si:Al dari 1, 2, atau 3 menginisiasi jaringan 3D yang sangat kaku, sedangkan rasio Si:Al yang lebih tinggi dari 15 memberikan karakter polimer untuk bahan geopolimerik.

Beton geopolimer telah banyak didokumentasikan keunggulannya dibandingkan beton tradisional dan dari komposisi kimianya dapat menjelaskan sebagian dari keuntungan tersebut. Beberapa sifat beton geopolimer dengan kinerja yang unggul untuk beton biasa termasuk kuat tekan, ketahanan kimia, tahan panas, kurangnya shrinkage dan ekspansi (Wagners, 2011). Berikut ini

menampilkan sifat dan berbagai aplikasi yang dimiliki geopolimer dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.2 Aplikasi Bahan Geopolimerik Berdasarkan Rasio Atom Silika dan Alumina

Rasio Si:Al	Aplikasi
1	Batu bata Keramik Pelindung api
2	semen dan beton rendah CO ₂ Radioaktif dan enkapsulasi limbah beracun
3	Serat kaca komposit pelindung kebakaran Peralatan pengecoran Komposit tahan panas 200 °C sampai 1000 °C Peralatan untuk aeronautika proses titanium
>3	Sealant untuk industri, 200°C to 600°C Peralatan untuk aeronautika SPF aluminium
20-35	Serat komposit tahan api dan tahan panas

Sumber : Davidovits, 2008

Tabel 2.3 Aplikasi Geopolimer

Aplikasi Geopolimer	
Semen dan Beton	matriks limbah enkapsulasi
Komposit untuk mobil dan pesawat	Aplikasi industri
Aplikasi dekoratif	Perbaikan dan penguatan infrastruktur
Api & bahan tahan panas	Pengolahan keramik biaya rendah
Geopolimer	Teknologi bangunan yang mudah dan rendah CO ₂
Aplikasi Foundry	<i>Item Refractory</i>
Sistem resin teknologi tinggi	Isolasi panas

Sumber: Davidovits, 2008

Geopolimer semen secara umum dimanfaatkan sebagai pengganti semen dengan aplikasi sebagai pasta, mortar maupun beton. Densitas, serapan air, kekuatan tekan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi aplikasi geopolimer semen. Tabel 2.4 menampilkan standar minimum yang diperlukan untuk *facing brick* (ASTM C90-09) dan *loadbearing concrete* (ASTM C216-10).

Tabel 2.4 Syarat-syarat Fisik *facing brick* dan *loadbearing concrete*

ASTM C90-09 <i>Loadbearing Concrete Masonary</i>	Serapan Air Maksimum, lb/ft ³ (kg/m ³)		Kekuatan Tekan Minimum, lb/ft ² (MPa)	
	Rata-rata 3 unit	Individu	Rata-rata 3 unit	Individu
<i>Lightweight</i>	18 (280)	20 (320)	1900 (13,1)	1700 (11,7)
<i>Medium Weight</i>	15 (240)	17 (272)	1900 (13,1)	1700 (11,7)
<i>Normal Weight</i>	13 (208)	15 (240)	1900 (13,1)	1700 (11,7)
ASTM C216-10 <i>Facing Brick</i>	Serapan Air Maksimum, 5 jam dipanaskan, %		Kekuatan Tekan Minimum, psi (MPa)	
	Rata-rata 5 unit	Individu	Rata-rata 5 unit	Individu
Grade SW	17,0	20,0	3000 (20,7)	2500 (17,2)
Grade MW	22,0	25,0	2500 (17,2)	2200 (15,2)

Ket: SW = Severe Weathering; MW = Moderate Weathering

Sumber: ASTM Standard

2.3.8 Keuntungan Geopolimer

Sifat mekanik yang lebih tinggi adalah alasan utama untuk penelitian lanjutan geopolimer beton. Kualitas spesimen akhir sangat tergantung pada asal bahan baku dan kualitas dari sumber Al-Si, aktivator, sumber agregat dan grading, sumber air dan jumlah campuran masing-masing bahan. Geopolimer memiliki karakteristik fisik yang lebih baik dari OPC (*Ordinary Portland Cement*) perbandingan karakteristik fisik ini dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.5 Perbandingan Karakteristik Fisik antara Binder OPC (*Ordinary Portland Cement*), MPCs (*Magnesium Phosphat Cements*), dan Geopolimer

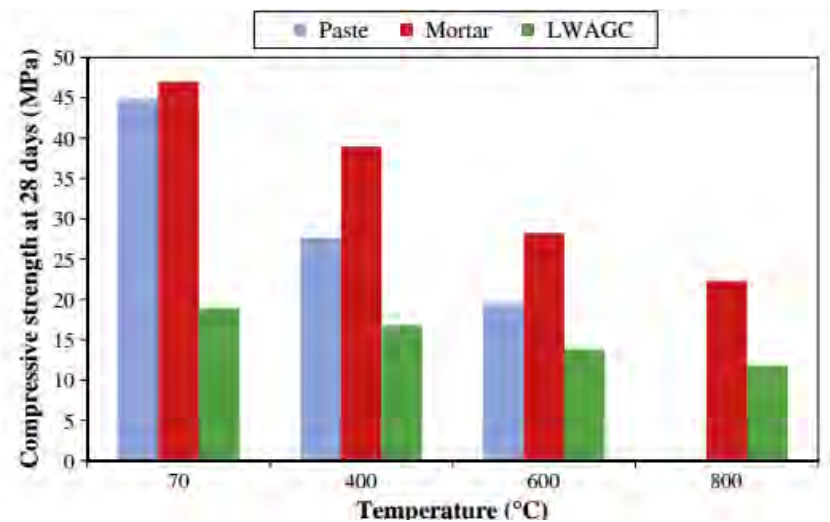
Perbandingan Karakteristik Fisik Khas (desain campuran khusus akan menghasilkan hasil yang berbeda)			
	OPC	MPCs	Geopolymers
Kuat tekan dalam Psi	3000-7000	8000-12000	5000-16000
Kuat tarik lentur dalam Psi	250-1000	900-1700	300-2900
Toleransi pH	6.5-14	3-11	3-14
Toleransi garam (paparan lanjut)	Tidak	Ya	Ya
Suhu struktur maksimal	1500 °F	2300 °F	2000-2700 °F
Waktu <i>curing</i> (<i>Demolding</i>)	1-2 hari	10 menit-2 jam	3 jam-3 hari
Waktu <i>curing</i> (kekuatan tinggi)	28 hari	3 hari	3 hari
Rentang suhu <i>curing</i>	1500 °F	1500 °F	1500 °F
Pengikatan diri	Tidak	Ya	Ya
Pengikatan untuk penguatan	Tidak	Ya	Ya
Menyusut setelah pengeringan	Ya	Tidak	Tidak
Koefisien pemuaian termal	0.000012	0.00000017	~0.000001
Penyerapan air	Ya	Tidak	Tidak
<i>Foamable</i>	Ya	Ya	Ya

Sumber: Sonafrank, 2010

Berbagai macam bahan dapat disintesis menjadi produk geopolimer dan banyak tersedia melalui tambang atau dari industri. Memanfaatkan limbah industri seperti *fly-ash* dari pembangkit listrik batubara dan terak dari produksi besi dapat menciptakan sinergi. Biaya penyimpanan dan pembuangan yang dihadapi industri dapat dikurangi dari permintaan baru yang sebelumnya tidak ada.

Geopolimer memiliki ketahanan terhadap panas yang baik. Kong dkk, (2010) meneliti pengaruh peningkatan suhu terhadap kekuatan geopolimer pasta, mortar dan beton dengan bahan berupa abu terbang. Geopolimer abu terbang diuji pada suhu 800°C dengan variasi ukuran spesimen, ukuran agregat, tipe agregat dan tipe plasticizer. Agregat dengan ukuran lebih besar dari 10 mm menghasilkan kekuatan tekan yang baik pada temperatur ruang dan temperatur yang dinaikkan. Dengan kekuatan maksimum setelah 3 hari adalah 72,4 MPa pada temperatur ruang dan 27,6 MPa pada temperatur 800°C. Agregat dengan ukuran yang paling kecil (<10mm) meningkatkan *spalling* dan perluasan retakan pada geopolimer beton dimana geopolimer yang mengandung agregat yang lebih besar (>10mm) lebih stabil pada temperatur tinggi.

Pada penelitian lain Abdulkareem, dkk (2014) mengamati pengaruh temperatur tinggi pada sifat mekanik geopolimer abu terbang pasta, mortar, dan beton ringan. Temperatur dinaikkan dengan variasi 70, 400, 600, dan 800°C (Gambar 2.7). Kekuatan tekan untuk semua sampel mengalami penurunan sepanjang peningkatan temperatur yang dilakukan. Geopolimer mortar dan geopolimer ringan memiliki ketahanan panas yang baik daripada geopolimer pasta pada suhu 800°C dengan kekuatan tekan masing-masing 22,07 dan 11,93 MPa. Geopolimer pasta mengalami laju kehilangan kekuatan yang paling tinggi selama peningkatan temperatur.



Gambar 2.8 Data Kekuatan Awal pada Geopolimer yang Belum Mengalami Perlakuan Panas dan Setelah Mengalami Perlakuan pada Suhu 400, 600, dan 800°C (Abdulkareem, 2014).

Geopolimer juga diketahui memiliki ketahanan terhadap lingkungan yang ekstrim berupa ketahanan terhadap serangan asam. Pengujian terhadap serangan asam telah dilakukan Hardjito (2005) dengan menggunakan larutan asam sulfida terhadap sampel geopolimer. Ketahanan terhadap serangan asam diketahui berdasarkan massa yang hilang dan kekuatan tekan geopolimer setelah kontak dengan asam selama 1 tahun. Setelah dilakukan pengujian diketahui bahwa massa yang hilang sebesar 3% dan kekuatan tekan tergantung dari konsentrasi asam larutan. Serangan asam menyebabkan degradasi kekuatan tekan beton geopolimer, peningkatan degradasi berdasarkan konsentrasi asam dan waktu kontak. Ketahanan asam beton geopolimer secara signifikan lebih baik dibandingkan dengan beton semen portland.

2.4 Ukuran Partikel dan Distribusi Ukuran Partikel

2.4.1 Pengertian Ukuran Partikel dan Distribusi Ukuran Partikel

Ukuran partikel, juga disebut ukuran butir, mengacu pada diameter butiran individu sedimen, atau partikel dalam batuan. Distribusi ukuran partikel (DUP) pada bubuk atau material granular atau partikel yang tersebar di cairan adalah daftar nilai atau fungsi matematika yang mendefinisikan jumlah relatif biasanya dengan massa partikel sesuai dengan ukuran.

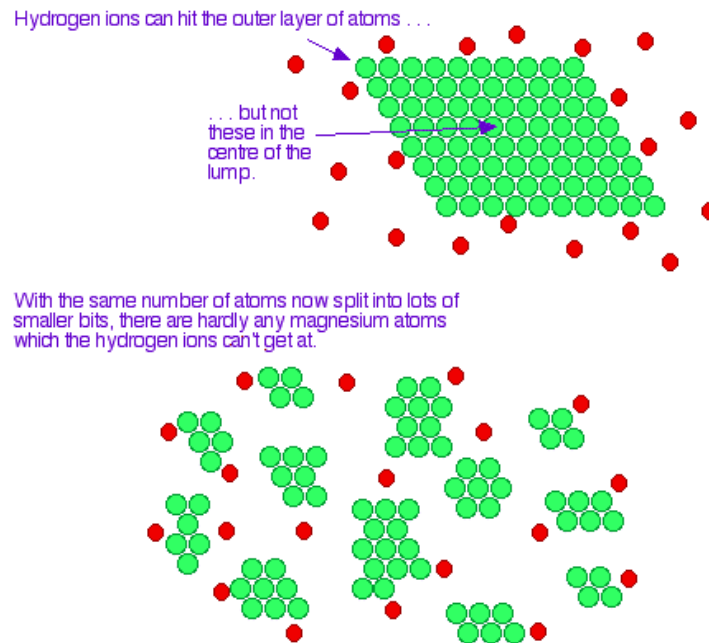
2.4.2 Ukuran Partikel dan Luas Permukaan

Berdasarkan teori tumbukan, reaksi akan terjadi apabila partikel-partikel saling bertumbukan, tercapainya energi aktivasi dan partikel berada pada jarak yang dekat satu sama lainnya (*steric effect*). Untuk meningkatkan frekuensi tumbukan diperlukan peningkatan kecepatan partikel atau lebih banyak partikel yang ada pada reaktan, agar tumbukan berhasil diperlukan energi yang cukup atau dengan cara penurunan energi aktivasi.

Salah satu cara peningkatan laju reaksi adalah dengan cara mengubah luasan permukaan. Peningkatan luasan permukaan akan meningkatkan proses tumbukan. Peningkatan luas permukaan dengan cara memotong bahan menjadi potongan-potongan kecil atau menggilingnya menjadi bubuk. Ditampilkan reaksi antara logam magnesium dan asam encer seperti asam klorida. Reaksi ini melibatkan tumbukan antara atom magnesium dan ion hidrogen dalam persamaan (2.17).



Ketika magnesium berupa gumpalan, ion hidrogen menumbuk pada lapisan luar dari atom magnesium. Bagian dalam dari gumpalan tidak mengalami tumbukan. Kemudian ketika gumpalan magnesium tersebut dihaluskan lagi menjadi potongan-potongan kecil maka akan lebih banyak tumbukan yang terjadi pada atom magnesium dan ion hidrogen. Penjelasan pengaruh luas permukaan ini diilustrasikan seperti pada Gambar 2.8. semakin banyaknya partikel yang bertumbukan akan meningkatkan laju reaksi dan produk yang dihasilkan.



Gambar 2.9 Ilustrasi Tumbukan Atom Magnesium dan Ion Hidrogen dengan Perbedaan Luas Permukaan (<http://chemwiki.ucdavis.edu>)

Distribusi ukuran partikel, faktor keseragaman dan area permukaan spesifik (APS) adalah parameter fisik yang penting yang mempengaruhi sifat semen. Parameter ini mendefinisikan proporsi partikel kasar dan halus di semen. Proporsi ini mengontrol kebutuhan air, pengaturan dan reaksi hidrasi (Sprung, 1985). Fraksi ukuran yang berbeda memiliki signifikansi untuk sifat mekanik dan kimia pada semen. Misalnya CaO, SiO atau kapur bebas dapat berkonsentrasi di beberapa fraksi ukuran yang mengarah ke berbagai komposisi fase semen (Lawrence, 1998). Fraksi ukuran memainkan peran yang berbeda dalam pengembangan kekuatan awal dan akhir. Sifat lainnya dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel adalah pelepasan panas, kapiler porositas perkolasi, difusivitas, penyusutan dan struktur mikro (Bentz, 1999).

Kekuatan sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel dalam kisaran 3-30 μm . Partikel yang lebih besar dari 60 μm hanya memiliki "efek pengisi" dan tidak ada kontribusi untuk pembangunan kekuatan (Skvara, 1991). Ukuran partikel mempengaruhi tidak hanya kekuatan tetapi juga memiliki beberapa efek pada panas hidrasi, susut, ekspansi. Faktor-faktor ini pada akhirnya mempengaruhi

kekuatan semen. Oleh karena itu banyak penelitian sedang dilakukan untuk mengurangi biaya dan meningkatkan kekuatan semen.

Bentz (1999) mengamati bahwa ukuran asli, distribusi spasial, dan komposisi partikel semen Portland memiliki pengaruh besar pada hidrasi, pengembangan mikro, dan sifat utama dari bahan berbasis semen. Efek dari distribusi ukuran partikel semen pada berbagai sifat kinerja dieksplorasi melalui simulasi komputer dan studi eksperimental.

Binici dkk (2007) meneliti efek dari distribusi ukuran partikel pada sifat-sifat campuran semen yang digabungkan dengan *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) dan pozzolan alam (PA). semen Portland murni (SPM), PA dan GGBFS digunakan untuk mendapatkan campuran semen yang mengandung 10, 20, 30% aditif. Semen yang diproduksi oleh intergrinding dan grinding terpisah dan kemudian blending. Setiap kelompok dengan dua kehalusan blaine yang berbeda 280 m²/g dan 480 m²/g. Menurut kurva distribusi ukuran partikel (DUP), 46% spesimen kasar dan 69% spesimen halus melewati saringan 20 µm. Diamati bahwa spesimen tersebut secara terpisah lebih halus daripada yang digiling dan memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dan ketahanan sulfat. Spesimen secara terpisah tanah kasar memiliki panas terendah hidrasi. Secara terpisah spesimen ground coarse lebih halus, memiliki kuat tekan tertinggi dan ketahanan sulfat. Spesimen ini 34, 69, 81 dan 99% melewati saringan 5, 20, 30 dan 55 µm. Untuk spesimen digiling, yang memiliki kehalusan yang sama, nilai-nilai masing-masing untuk saringan yang sama adalah 32, 68, 75 dan 94%.

Giasvand (2014) meneliti pengaruh metode gerinding dan distribusi ukuran partikel terhadap sifat semen portland-pozzolan dengan menggunakan 10 tipe semen. Hasil penelitiannya adalah semen portland-pozzolan (SPP) menghasilkan sifat mekanik dan ketahanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan semen portland (SP). Sifat ketahanan tidak dipengaruhi oleh metode grinding.

Sarathi (2014) meneliti pengaruh perbedaan proporsi *ground granulated blast-furnace slag* (GGBFS) dan keberadaan aktivator terhadap sifat kemampuan kerja dan kekuatan pada beton geopolimer abu terbang. Peningkatan kekuatan yang signifikan dan penurunan beberapa kemampuan kerja telah diamati pada

beton geopolimer dengan GGBFS yang tinggi dan rasio natrium silika dan natrium hidroksida yang rendah.

2.5 Semen Portland Biasa

2.5.1 Pengertian

Semen Portland biasa adalah semen hidrolisis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambahkan dengan bahan tambahan lain. Semen portland bereaksi dengan air secara eksotermik dan menjadi keuntungan pada beberapa kondisi karena cepatnya pengerasan.

2.5.2 Jenis dan Penggunaan

Semen Portland berdasarkan jenis dan kegunaan dibagi menjadi:

- Jenis I yaitu semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
- Jenis II yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
- Jenis III yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
- Jenis IV yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah
- Jenis V yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

2.5.3 Syarat Mutu

Persyaratan kimia semen portland harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

Tabel 2.6 Syarat Kimia Utama Semen Portland

No.	Uraian	Jenis Semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	SiO ₂ , minimum		20,0 ^{b,c)}			
2	Al ₂ O ₃ , maksimum		6,0			
3	Fe ₂ O ₃ , maksimum		6,0 ^{b,c)}			
4	MgO, maksimum	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
5	SO ₃ , maksimum Jika C ₃ A ≤ 8.0 Jika C ₃ A ≥ 8.0					
6	Hilang pijar, maksimum	5,0	3,0	3,0	2,5	3,0
7	Bagian tak larut, maksimum	3,0	1,5	1,5	1,5	1,5
8	C ₃ S, maksimum ^{a)}				35 ^{b)}	
9	C ₂ S, minimum ^{a)}				40 ^{b)}	
10	C ₃ A, maksimum ^{a)}		8,0	15	7 ^{b)}	5 ^{b)}
11	C ₄ AF + 2C ₃ A atau ^{a)} C ₄ AF + C ₂ F, maksimum					25 ^{c)}

CATATAN

- a) Persyaratan pembatasan secara kimia berdasarkan perhitungan untuk senyawa potensial tertentu tidak dapat diartikan bahwa oksida senyawa potensial tersebut dalam keadaan murni.

C=CaO, S=SiO₂, A=Al₂O₃, F=Fe₂O₃, Contoj C₃A=3CaO.Al₂O₃

Titanium dioksida (TiO₂) dan Fosfor pentaoksida (P₂O₅) termasuk dalam Al₂O₃

Nilai yang biasa digunakan untuk Al₂O₃ dalam menghitung senyawa potensial (misal : C₃A) untuk tujuan spesifikasi adalah jumlah endapan yang diperoleh dengan penambahan NH₄OH dikurangi jumlah Fe₂O₃ (R₂O₃-Fe₂O₃) diperoleh dalam analisis kimia basah.

Apabila: $\frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3} \geq 0,64$, maka persentase C₃S, C₂S, C₃A

Dan C₄AF dihitung sebagai berikut:

$$C_3S = 3CaO.SiO_2 = (4,071 \times \% CaO) - (7,600 \times \% SiO_2) - (6,718 \times \% Al_2O_3) - (1,430 \times \% Fe_2O_3) - (2,852 \times \% SO_3)$$

$$C_2S = 2CaO.SiO_2 = (2,867 \times \% SiO_2) - (0,7544 \times \% C_3S)$$

$$C_3A = 3CaO.Al_2O_3 = (2,650 \times \% Al_2O_3) - (1,692 \times \% Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 = (3,043 \times \% Fe_2O_3)$$

Apabila: $\frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3} < 0,64$, terbentuk larutan padat

$$(C_4AF + C_2F) = 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$$

Semen dengan komposisi ini didalamnya tidak terdapat C₃S tetap dihitung dengan menggunakan rumus di atas: Perhitungan untuk semua senyawa potensial adalah berdasarkan hasil penentuan oksidanya yang dihitung sampai sedekat mungkin 0,1%. Semua hasil perhitungan dilaporkan sampai sedekat mungkin dengan 1,0%

- b) Apabila yang disyaratkan adalah kalor hidrasi seperti yang tercantum pada Tabel syarat fisika tambahan (Tabel 2.7), maka syarat kimia ini tidak berlaku.
- c) Apabila yang disyaratkan adalah pemuai karena sulfat yang tercantum pada Tabel syarat fisika tambahan (Tabel 2.7), maka syarat kimia ini tidak berlaku.
- d) Tidak dapat dipergunakan

Sumber: SNI 15-2049-2004

Tabel 2.7 Syarat Kimia Tambahan Semen Portland^{a)}

No	Uraian	Jenis Semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	C ₃ A, maksimum	-	-	8	-	-
2	C ₃ A, minimum	-	-	5		
3	(C ₃ S + 2 C ₃ A), maksimum	-	58b)	-		
4	Alkali sebagai (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O), maksimum	0,60 ^{c)}	0,60 ^{c)}	0,60 ^{c)}	0,60 ^{c)}	0,60 ^{c)}

CATATAN

- a) Syarat kimia tambahan ini berlaku hanya secara khusus disyaratkan.
- b) Sama dengan keterangan untuk pada syarat kimia utama.
- c) Hanya berlaku bila semen digunakan dalam beton yang agregatnya bersifat reaktif terhadap alkali

Sumber: SNI 15-2049-2004

Persyaratan fisika semen portland harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

Tabel 2.8 Syarat Fisika Utama Semen Portland

No.	Uraian	Jenis semen portland				
		I	II	III	IV	V
1	Kehalusan: Uji permeabilitas udara, m ² /kg Dengan alat: Turbidimeter, min Blaine, min	160 280	160 280	160 280	160 280	160 280
2	Kekekalan: Pemuai dengan autoclave, maks %	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
3	Kuat tekan: Umur 1 hari, kg/cm ² , minimum Umur 3 hari, kg/cm ² , minimum Umur 7 hari, kg/cm ² , minimum Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	- 125 200 280	- 100 175 -	120 240 - -	- - 70 170	- 80 150 210

4	Waktu pengikatan (metode alternatif) dengan alat: Gillmore					
	- Awal, menit, minimal	60	60	60	60	60
	- Akhir, menit, maksimum	600	600	600	600	600
	Vicat					
	- Awal, menit, minimal	45	45	45	45	45
	Akhir, menit, maksimum	375	375	375	375	375

CATATAN

Syarat kuat tekan ini berlaku jika syarat kalor hidrasi seperti tercantum pada Tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4) atau jika syarat $C_3S + C_3A$ seperti tercantum pada Tabel syarat kimia tambahan diisyaratkan (Tabel 2).

Sumber: SNI 15-2049-2004

Tabel 2.9 Syarat Fisika Tambahan Semen Portland^{a)}

No.	Uraian	Jenis Semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	Pengikatan semu penetrasi akhir, % minimum	50	50	50	50	50
2	Kalor hidrasi					
	Umur 7 hari, kal/gram, maks	-	70 ^{b)}	-	60	-
	Umur 28 hari, kal/gram, maks	-	-	-	70	-
3	Kuat tekan: Umur 28 hari, kg/cm, minimum	-	280	-	-	-
4	Pemuaian karena sulfat 14 hari, %, maksimum	-	220 ^{b)}	-	-	0,040
5	Kandungan udara mortar, % volume, maksimum	12	12	12	12	12

CATATAN

a) Persyaratan fisika tambahan ini berlaku hanya jika secara khusus diminta.

b) Bila syarat kalor hidrasi ini disyaratkan, maka syarat $C_3S + C_3A$ seperti tercantum pada Tabel kimia tambahan (Tabel 2) tidak diperlukan.

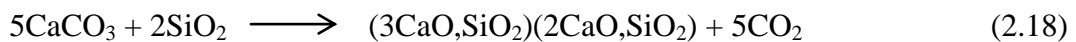
Syarat kuat tekan ini berlaku bila syarat kalor hidrasi seperti yang tercantum pada Tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4) atau bila syarat $C_3S + CA$ seperti yang tercantum pada Tabel syarat kimia tambahan (Tabel 2) disyaratkan.

Sumber: SNI 15-2049-2004

2.5.4 Pembuatan Semen Portland

Semen Portland dibuat dengan mengkalsinasi campuran batu kapur (*limestone*) dengan tanah liat (*clay*) pada suhu tinggi untuk menghasilkan suatu produk sinter klinker, klinker dicampur dengan beberapa persen gypsum dan dihaluskan untuk menghasilkan semen (reaksi 2.18). Gypsum mengontrol laju dan sebagian digantikan menjadi bentuk lain berupa kalsium sulfat. Beberapa

spesifikasi memungkinkan penambahan bahan lain pada tahap penggilingan. Klinker memiliki komposisi 67% CaO, 22% SiO₂, 5% Al₂O₃, 3% Fe₂O₃ dan 3% komponen yang lain, dan biasanya mengandung 4 fase utama yaitu alite, belite, fase aluminat dan fase ferrite. Beberapa fase lain seperti alkali sulfat dan kalsium oksida ada dalam jumlah yang kecil. Semen ordinary portland merupakan hasil dari kalsinasi batu gamping (kalsium karbonat) dan silika berdasarkan reaksi (2.18) berikut:



Alite merupakan konstituen yang paling penting pada semua klinker semen portland yang mencapai 50-70%. Alite merupakan trikalsium silikat (Ca₃SiO₅) diubah dalam komposisi dan struktur kristal dengan penggabungan ion asing, terutama Mg²⁺, Al³⁺ dan Fe³⁺. Bereaksi relatif cepat dengan air, dan pada semen portland biasa merupakan konstituen yang paling penting dalam pengembangan kekuatan pada umur 28 hari.

Belite merupakan konstituen yang terdapat pada klinker semen portland mencapai 15-30%. Belite merupakan dikalsium silikat (Ca₂SiO₄) dimodifikasi dengan penggabungan ion asing dan keberadaan yang seluruhnya atau sebagian besar sebagai *β polymorph*. Bereaksi perlahan dengan air sehingga memberikan kontribusi yang sedikit pada kekuatan selama 28 hari pertama, tetapi substansial untuk peningkatan kekuatan lebih lanjut. Setelah satu tahun, kekuatan dari alite dan belite murni sebanding pada kondisi yang sama.

Fase aluminat mencapai 5-10% pada klinker semen portland. Aluminat merupakan trikalsium aluminat (Ca₃Al₂O₆), secara substansial dimodifikasi dalam komposisi dan kadang-kadang juga didalam struktur dengan penggabungan ion asing, terutama Si⁴⁺, Fe³⁺, Na⁺, dan K⁺. Fase aluminat bereaksi cepat dengan air, dan dapat menyebabkan *rapid setting* yang tidak diinginkan kecuali adanya agen pengendali biasanya gipsum yang ditambahkan.

Fase ferit mencapai 5-15% pada klinker semen portland. Ferit merupakan tetrakalsium aluminoforit (Ca₂AlFeO₅), secara substansial dimodifikasi oleh variasi rasio Al/Fe dan penggabungan ion asing. Secara umum ferit yang bereaksi

dengan air dengan laju yang tinggi pada permulaan dan laju menengah antara alite dan belite pada tahun selanjutnya.

Didalam pembuatan klinker semen portland, material dasar berupa batu kapur dan tanah liat dimixing dan dipanaskan hingga temperatur diatas 1450°C . Secara prinsipil reaksi pembuatan klinker dibagi menjadi 3 yaitu (Taylor, 1990):

1. Reaksi dibawah 1300°C yang paling penting berupa (a) dekomposisi kalsit (kalsinasi), (b) dekomposisi mineral tanah liat, dan (c) reaksi antara kalsit/batu kapur dan quartz dan dekomposisi mineral tanah liat untuk membentuk belite, aluminat dan ferit. Terbentuk sedikit cairan pada tahap ini, tapi mungkin memiliki pengaruh yang penting dalam mempromosikan reaksi. Pada bagian akhir tahap ini terbentuknya mayor fase yaitu belit, kapur, aluminat dan ferit.
2. Reaksi pada $1300\text{-}1450^{\circ}\text{C}$ (klinkering). Terbentuk lelehan, terutama dari aluminat dan ferit, dan pada 1450°C sebanyak 20-30% campuran berupa cairan. Banyak dari belit dan hampir semua kapur bereaksi dalam lelehan membentuk alite. Material membentuk bintil (*nodulizes*) untuk membentuk klinker.
3. Reaksi selama pendinginan, terjadi kristalisasi cairan terutama pada aluminat dan ferit. Terjadinya transisi polimorfik alite dan belite.

Produksi 1 Ton semen secara langsung menghasilkan 0.55 ton CO_2 dan membutuhkan pembakaran dari bahan bakar karbon yang menghasilkan tambahan 0.44 ton CO_2 . Komponen utama dan alasan kekuatan yang tinggi beton semen Portland biasa dibandingkan dengan kapur terhidrasi adalah karena trikalsium silikat (C_3S) yang merupakan senyawa (dibentuk pada 1400°C). Seperti yang ditunjukkan bahwa kekuatan tinggi memerlukan banyak energi, pemanasan kapur dan silika (masing-masing 74% dan 26%) untuk setiap suhu di bawah 1.250°C hanya menghasilkan dikalsium silikat (C_2S) dan kapur cepat yang dasarnya adalah kapur.

Pada saat *setting* dan pengerasan, oksida bereaksi dengan air untuk membentuk sedikit kalsium silikat hidrat ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) dan kapur $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Oksida C_3S dan C_3A bertanggung jawab terhadap kekuatan awal, sementara C_2S

mengeras pada laju yang lebih lambat dan bertanggung jawab terhadap sebagian besar kekuatan akhir semen (Neville, A.M, 2004).

Air dan karbon dioksida dilepaskan selama pengapian (*loss of ignition*) yang didefinisikan sebagai penurunan persentase berat dari pemanasan bahan atau sampel semen pada 1000°C. Persentase LOI tidak melebihi 5% atau akan memiliki efek buruk pada semen akhir. Residu larut adalah sebagian kecil dari senyawa tanah liat yang tidak larut dalam asam klorida. Magnesium oksida (MgO) adalah komponen semen yang bertanggung jawab untuk warna hijau-abu beton dan ditemukan dalam jumlah kecil di batu kapur. Beberapa batu gamping “dolomit” mengandung jumlah MgO berlebihan yang dapat memiliki waktu tunda ekspansi selama beberapa tahun. Karena sifat ekspansi tertunda ini, kapur dolomit tidak digunakan dalam pembuatan semen (Czernin 1980).

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3

METODE PENELITIAN

Pada Bab ini dipaparkan tentang metode penelitian sintesis geopolimer semen dengan bahan baku terak Fe-Ni mencakup tentang alat dan bahan, prosedur penelitian dan pengujian yang dilakukan pada geopolimer semen terak Fe-Ni.

3.1 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Terak Fe-Ni

Terak Fe-Ni yang digunakan berasal dari *smelting* bijih Fe-Ni yang berasal dari Pomala selanjutnya dianalisa komposisi kimia menggunakan EDAX.



(a)

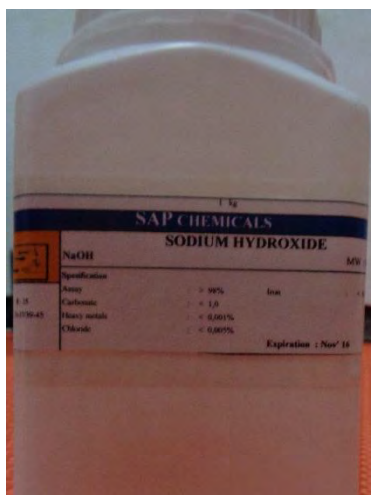


(b)

Gambar 3.1 Terak Fe-Ni (a) Bongkahan Terak Fe-Ni; (b) Setelah Dihaluskan

2. Serbuk NaOH produksi SAP Chemicals dengan spesifikasi:

<i>Assay</i>	: >98%
<i>Carbonate</i>	: <1,0%
<i>Heavy metals</i>	: <0,001%
<i>Chloride</i>	: <0,005%



Gambar 3.2 Serbuk Natrium Hidroksida

- Larutan natrium silikat *extra pure* (K46445221517) merk Merck dengan spesifikasi:

Density : 1,296-1,396 g/ml

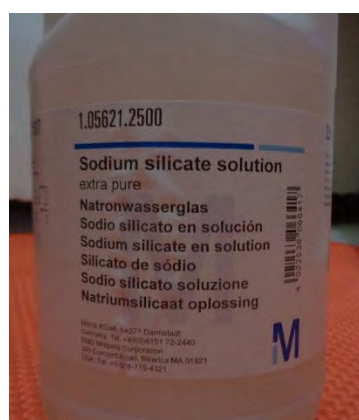
Assay (acidimetric, Na_2O) : 7,5-8,5 %

Assay (acidimetric, SiO_2) : 25,5-28,5 %

Carbonate (as CO_2) : *passes test*

Fe (Iron) : $\leq 0,005\%$

Heavy metals (as Pb) : $\leq 0,005\%$



Gambar 3.3 Larutan Natrium Silikat *Extra Pure*

- Air Aquades

3.2 Alat

Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spatula digunakan untuk mengambil serbuk NaOH.
2. Masker dan sarung tangan digunakan sebagai alat pelindung diri dan untuk mengantisipasi terjadinya kontaminasi serbuk.
3. *Beaker glass* digunakan sebagai tempat pencampuran serbuk.
4. *Hand mixer*
5. Neraca digital digunakan untuk menimbang massa terak Fe-Ni, serbuk NaOH, Na₂O, SiO₂.
6. Lumpang besi
7. Ayakan

Ayakan mesh standar ASTM E11 dengan jaring berupa kawat baja.



Gambar 3.4 Ayakan Mesh ASTM E11-04

8. Oven

Oven Toaster Maspion MOT-600 dengan spesifikasi:

- *Power*: 220V-850W
- *Timer* 60 menit
- Maksimal temperatur 250°C
- Dimensi ruang pembakaran 24x28x23 cm³.



Gambar 3.5 Oven dengan Kontrol Temperatur

9. Cetakan binder

Cetakan binder geopolimer dengan dimensi $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$. Bahan cetakan berupa besi cor dengan tiga sampel tiap cetakan.



Gambar 3.6 Cetakan Trigang.

10. Alat uji tekan (*Universal Testing Machine*)

Pengujian tekan menggunakan alat *Universal Testing Machine* Model UH-500kNI merk Shimadzu Corporation di laboratorium *Concrete and Building Material* Teknik Sipil (Gambar 3.7). Alat ini digunakan untuk mengetahui sifat mekanik dari sampel geopolimer semen berbasis terak Fe-Ni.

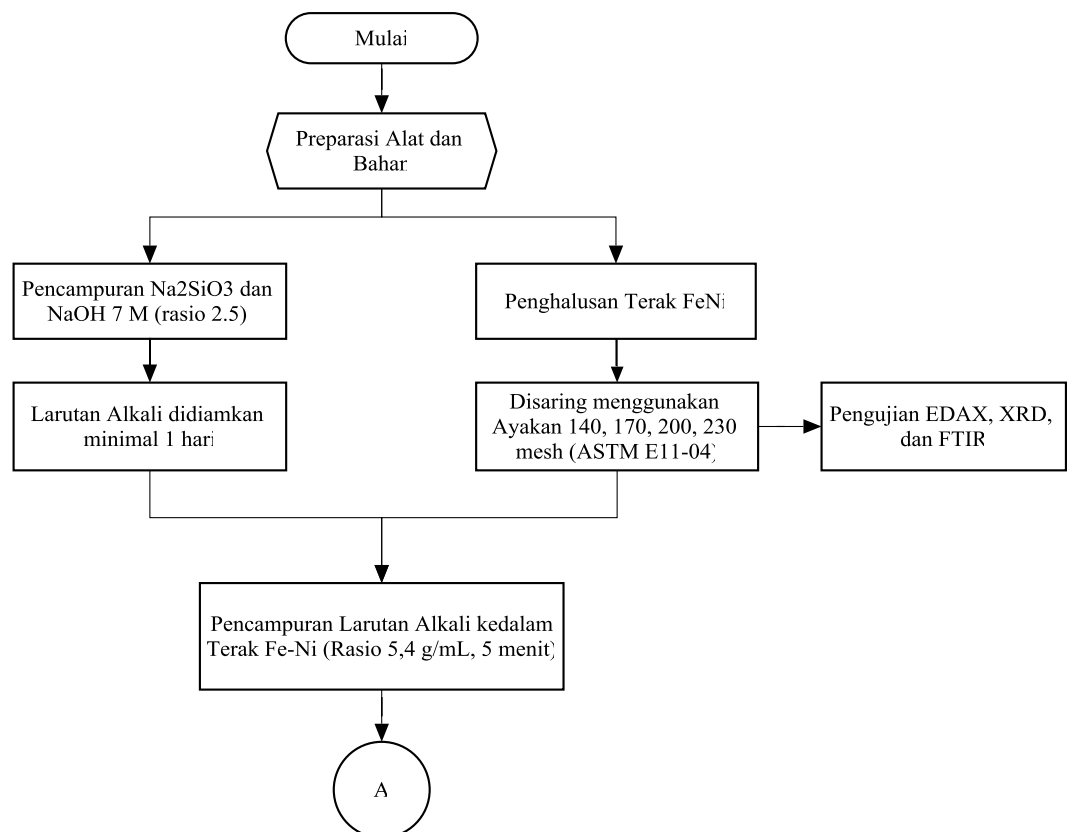


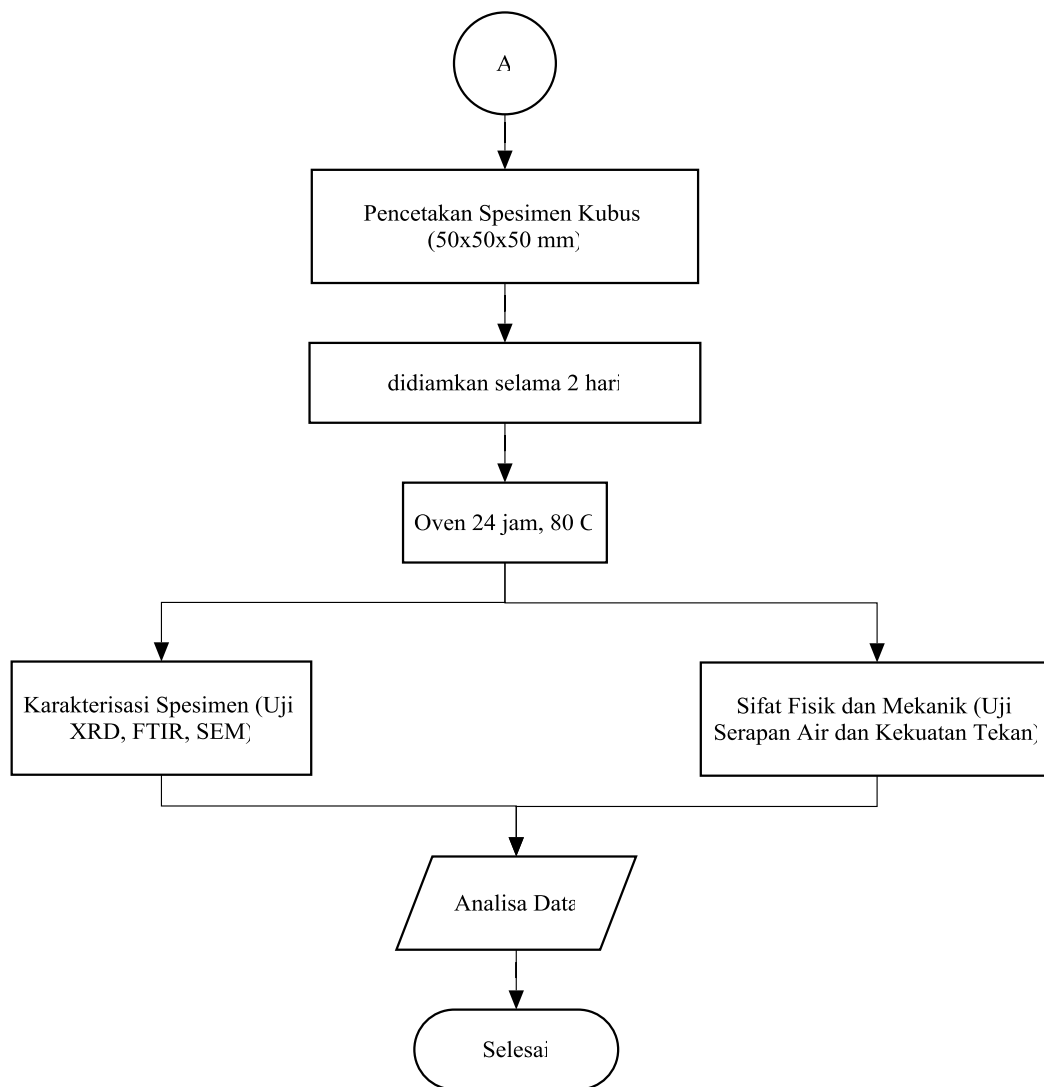
Gambar 3.7 Alat Uji Tekan

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.8. Penelitian ini menggunakan bahan utama berupa terak Fe-Ni dan larutan aktivator.





Gambar 3.8 Diagram Alir Penelitian

3.3.2 Rancangan Variabel

Pada penelitian ini dilakukan pengujian dengan memvariasikan ukuran partikel dari terak Fe-Ni. Ukuran partikel yang dipilih berdasarkan ASTM E11-04 mulai dari 106, 90, 75, dan 63 μm . Aktivator yang digunakan adalah NaOH 7 Molar, NaSiO_3 , rasio larutan natrium silikat dan natrium hidroksida 2.5, dan ratio solid liquid (S/L) adalah 5.4 g/mL. Berdasarkan diagram alir dan variabel yang digunakan dengan masing-masing ukuran dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali, maka rancangan percobaan yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Rancangan Percobaan Pembuatan dan Pengujian Geopolimer Semen Terak Fe-Ni

Kode Sampel	Ukuran Partikel (μm)	Massa Terak Fe-Ni (g)	Ratio S/L (g/mL)	Ratio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Curing ($^{\circ}\text{C}$, jam)	Karakterisasi			Pengujian	
						XRD	FTIR	SEM	Serapan Air	Kekuatan Tekan
151	106	850	5,4	2,5	80, 24			✓	✓	✓
152									✓	✓
153									✓	✓
181	90	850	5,4	2,5	80, 24			✓	✓	✓
182									✓	✓
183									✓	✓
201	75	850	5,4	2,5	80, 24			✓	✓	✓
202									✓	✓
203									✓	✓
231	63	850	5,4	2,5	80, 24	✓	✓	✓	✓	✓
232									✓	✓
233									✓	✓

3.3.3 Preparasi Aktivator

Natrium hidroksida (NaOH) padat dilarutkan ke dalam air untuk membuat larutan. Massa padatan NaOH di dalam larutan tergantung pada konsentrasi larutan yang dinyatakan dalam molar, larutan NaOH dengan konsentrasi 7 Molar dibuat dari $7 \times 40 = 280$ gram NaOH padat per liter larutan, dimana 40 adalah massa relatif NaOH.

Larutan natrium silikat dan natrium hidroksida dicampur bersama paling sedikit 1 hari sebelum dipersiapkan untuk cairan alkali. Pada waktu pencetakan sampel, cairan alkali dicampur dengan air (jika diperlukan) untuk membuat komponen cairan pada campuran

3.3.4 Pencampuran dan Curing

Davidovits (2002) menyarankan bahwa lebih baik untuk mencampurkan larutan natrium silikat dan larutan natrium hidroksida bersama-sama minimal 1 hari sebelum ditambahkan kedalam konstituen padat. Natrium silikat yang diperoleh dipasaran biasanya bentuk dimer dan trimer daripada monomer, dan pencampuran bersamaan dengan larutan natrium hidroksida membantu proses polimerisasi.

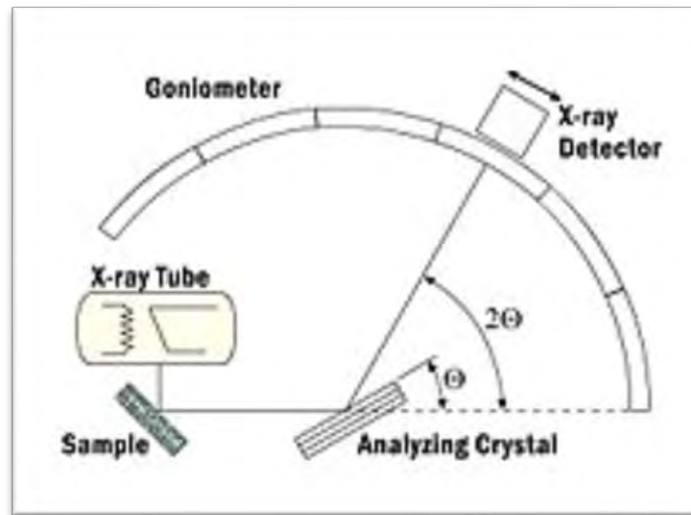
Campuran yang digunakan dalam penelitian ini adalah terak Fe-Ni dengan variasi ukuran, larutan alkali dengan ratio larutan natrium silikat dan natrium hidroksida 2,5, natrium hidroksida (NaOH) 7 molar dan ratio solid liquid (S/L) adalah 5.4 g/mL. Pencampuran terak Fe-Ni dengan aktivator dilakukan dengan menggunakan *mixer* hingga tercampur dengan sempurna. Sampel binder geopolimer dicetak dengan dimensi kubus 50x50x50 mm dan didiamkan selama 2 hari selanjutnya dilepaskan dari cetakan dan dimasukkan ke dalam oven sebagai proses *curing* pada temperatur yang dinaikkan sampai 80°C didalam oven untuk mencegah penguapan berlebihan, lama waktu *curing* adalah 24 jam. Selanjutnya dilakukan pengujian kekuatan tekan (ASTM C109) dan serapan air (ASTM C1403) pada umur 28 hari.

3.4 Pengujian

3.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD ini adalah sebuah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui senyawa/unsur (analisis kualitatif) yang terbentuk pada sampel dan penentuan komposisi sampel (analisis kuantitatif). Analisis yang dilakukan berhubungan dengan pengujian lainnya, misalnya SEM atau TEM. Pengamatan dengan mikroskop akan menjelaskan bagaimana distribusi fasa yang teridentifikasi berdasarkan hasil karakterisasi XRD.

Pengujian ini memanfaatkan difraksi dari sinar-X. Secara umum prinsip kerja XRD dapat dilihat pada Gambar 3.9, yaitu generator tegangan tinggi yang berfungsi sebagai pembangkit daya sumber sinar-X pada bagian *x-ray tube*. Sampel padat dan serbuk yang telah dimampatkan diletakkan di atas wadah yang dapat diatur posisinya. Berkas sinar-X ditembakkan ke sampel dan sinar-X didifraksikan oleh sampel, kemudian berkas sinar-X masuk ke alat pencacah. Intensitas difraksi sinar-X ditangkap oleh detektor dan diterjemahkan dalam bentuk kurva.



Gambar 3.9 Skema Kerja *X-Ray Diffraction* (XRD) (<https://en.wikipedia.org>)

Sampel dianalisis menggunakan XRD dengan mesin *Panalytical*. Data dan grafik hasil pengujian XRD selanjutnya dicocokkan dengan menggunakan JCPDS (*Joint Committee of Powder Diffraction Standard*) untuk mengetahui struktur kristal yang sesuai.

Analisis kualitatif tidak hanya mengidentifikasi unsur apa saja yang ada dalam sampel, tetapi juga konsentrasi unsur tersebut. Untuk melakukan analisis kuantitatif maka perlu dilakukan beberapa proses seperti meniadakan *background*, *deconvolusi peak* yang bertumpang tindih dan menghitung konsentrasi unsur. Interpretasi konstruktif radiasi sinar-X yang telah dideteksi detektor selanjutnya akan diperkuat gelombangnya dengan menggunakan *amplifier*. Lalu interpretasi konstruktif radiasi sinar-X tersebut akan terbaca secara spektroskopi sebagai puncak-puncak serapan. Dengan menganalisis puncak-puncak grafik tersebut maka kandungan material dan struktur kristal serta komponen-komponen kristalografinya dapat diketahui.

Seluruh sampel substrat dianalisis dengan menggunakan alat XRD PANalytical seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10 dan dicocokkan dengan *Joint Committee of Powder Diffraction Standard* (JCPDS). Mesin XRD PANalytical yang akan digunakan telah tersedia di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS.

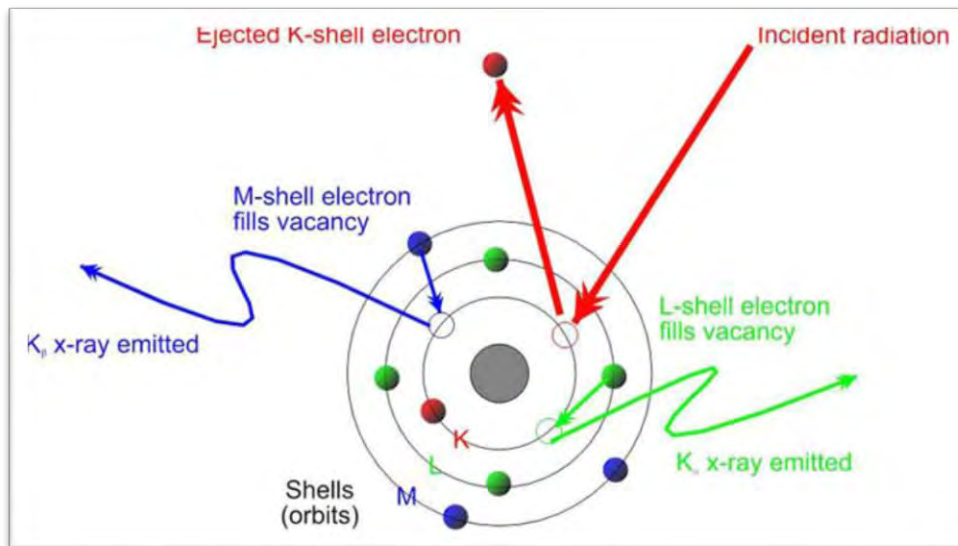


Gambar 3.10 Mesin XRD PANalytical

3.4.2 XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometry)

Karakterisasi XRF merupakan teknik analisa non-destruktif untuk identifikasi serta penentuan konsentrasi elemen yang ada pada padatan, bubuk ataupun sample cair. Pengujian ini digunakan untuk mengetahui komposisi kimia material sehingga kita dapat menganalisa unsur-unsur apa saja yang membangun material tersebut.

Pinsip XRF (Gambar 3.11), apabila terjadi eksitasi sinar-X primer yang berasal dari tabung X ray atau sumber radioaktif mengenai sampel, sinar-X dapat diabsorpsi atau dihamburkan oleh material. Proses dimana sinar-X diabsorpsi oleh atom dengan mentransfer energinya pada elektron yang terdapat pada kulit yang lebih dalam disebut *efek fotolistrik*. Bila sinar-X primer memiliki cukup energi, elektron pindah dari kulit yang di dalam menimbulkan kekosongan. Kekosongan ini menghasilkan keadaan atom yang tidak stabil. Apabila atom kembali pada keadaan stabil, elektron dari kulit luar pindah ke kulit yang lebih dalam dan proses ini menghasilkan energi sinar-X yang tertentu dan berbeda antara dua energi ikatan pada kulit tersebut. Emisi sinar-X dihasilkan dari proses yang disebut *X Ray Fluorescence*.



Gambar 3.11 Prinsip Kerja XRF (<http://alloytester.com>)

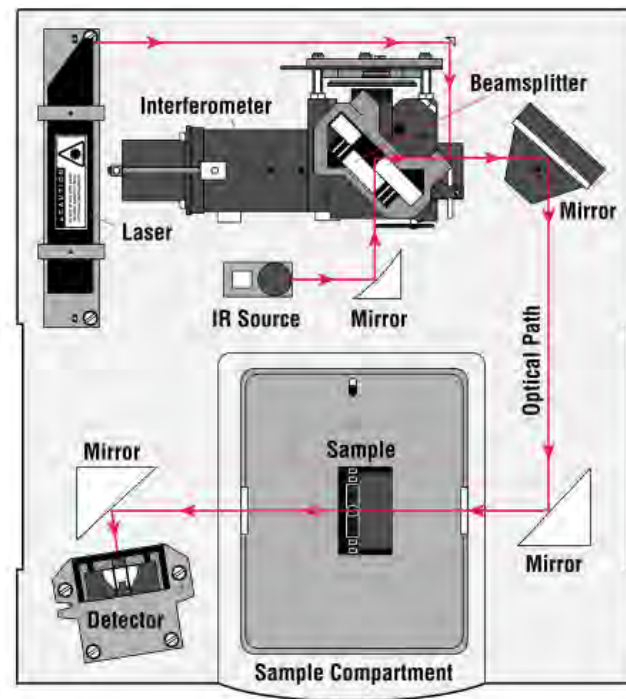
3.4.3 Fourier Transform Infrared (FTIR)

FTIR adalah salah satu metode spektroskopi dengan memanfaatkan sinar inframerah. Spektroskopi inframerah memancarkan sinar inframerah melewati sampel. Beberapa radiasi inframerah diserap oleh sampel dan beberapa diteruskan (*transmitted*). Spektrum yang dihasilkan menampilkan absorpsi dan transmisi molekul, yang membentuk *fingerprint* molekular dari sampel. Seperti halnya *fingerprint*, tidak ada struktur molekul yang sama yang dihasilkan spektrum inframerah.

Spektroskopi Fourier Transform Infrared (FT-IR) dikembangkan dalam rangka untuk mengatasi keterbatasan instrumen dispersi. Masalah utamanya adalah proses *scanning* yang lambat. Diperlukan metode untuk mengukur semua frekuensi inframerah secara terus menerus daripada secara individu. Sebuah solusi dikembangkan dengan menggunakan peralatan optik sederhana yang disebut *interferometer*. Interferometer menghasilkan tipe sinyal yang unik yang mana semua frekuensi inframerah dikodekan olehnya. Sinyal dapat diukur dengan sangat cepat, biasanya dalam waktu satu detik atau lebih. Sehingga setiap elemen didalam sampel dapat diketahui dengan lebih cepat.

Interferometer kebanyakan menggunakan sebuah *beamsplitter* yang mana memisahkan sinar inframerah yang datang kedalam dua sinar optik. Satu

sinar dipantulkan oleh cermin datar yang diam, dan satu sinar lagi dipantulkan oleh cermin datar yang dapat digerakkan sehingga dapat menggerakkan cermin pada jarak yang pendek (milimeter) menjauhi *beamsplitter*. Kedua sinar yang dipantulkan bersama-sama oleh kedua cermin kemudian menyatu kembali ketika sampai ke beamsplitter. Oleh karena satu sinar berpindah dengan jarak yang tetap dan satu sinar lagi berpindah pada jarak yang berubah-ubah sesuai dengan pergerakan cermin. Sinyal yang dihasilkan oleh *interferometer* adalah dua sinar yang interfering satu sama lainnya. Sinyal yang dihasilkan *interferogram* yang mana menghasilkan sifat yang unik untuk setiap point data (fungsi dari pergerakan cermin) yang mana menghasilkan sinyal yang memiliki informasi tentang setiap frekuensi inframerah yang datang. Skema kerja alat spektrometer inframerah dapat dilihat pada Gambar 3.12



Gambar 3.12 Skema Kerja Alat Spektroskopi Inframerah (Thermo Nicolet, 2001)

Menganalisa sinar inframerah memerlukan frekuensi spektrum (sebuah plot intensitas untuk masing-masing frekuensi) dalam rangka untuk mengidentifikasi sinyal hasil pengukuran *interferogram*. Dibutuhkan pengkodean

untuk masing-masing frekuensi dan dapat dilakukan dengan baik menggunakan teknik matematika *Fourier transformation*. Transformasi ditampilkan oleh komputer dan pengguna dapat menganalisa spektra yang diinginkannya.

3.4.4 Serapan Air (Water Absorption)

Pengujian *water absorption* didasarkan pada ASTM C 1403 pada Gambar 3.13 ditampilkan konfigurasi pengujian serapan air sampel. Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut.

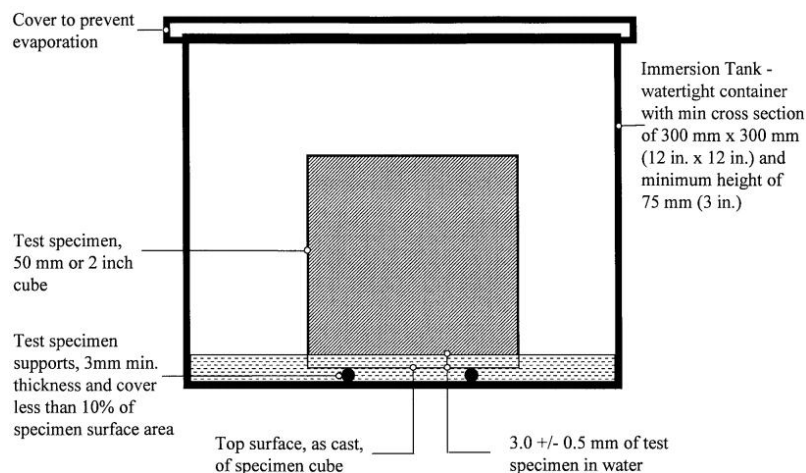
- Menghitung luas permukaan tes untuk tiap spesimen dari panjang dan lebar permukaan uji.
- Catat berat awal sebagai W_0 dalam gram hingga 0,1 g dari tiap spesimen individu segera sebelum pengujian.
- Tempatkan tangki perendaman pada permukaan datar. Tempatkan semua spesimen dalam tangki perendaman dengan bagian atasnya, sebagai cetakan, yang kontak dengan spesimen seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.3.
- Tambahkan air ke tangki perendaman sehingga spesimen sebagian terendam dalam $3,0 \pm 0,5$ mm ($0,12 \pm 0,02$ in.) air. Tutup tangki perendaman untuk meminimalkan penguapan.
- Pada 0,25, 1, 4, dan 24 jam, mengukur berat dalam gram hingga 0,1 g tiap spesimen dan catat sebagai W_T dimana T adalah waktu pengukuran dalam jam. Bersihkan air permukaan dari tiap spesimen dengan kain basah sebelum masing-masing memberat. Lengkapi lap dengan penghilangan dari kontak dengan air dalam waktu 10 s dan menyelesaikan pemberatan dalam 1 menit.
- Setelah masing-masing memberat, memindahkan spesimen ke dalam tangki perendaman dan tambahkan air yang diperlukan untuk menjaga kedalaman perendaman seperti ditentukan dalam langkah (d). Menutup kembali tangki perendaman.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung penyerapan air adalah sebagai berikut.

$$A_T = \frac{(W_T - W_0) \times 10000}{(L_1 \times L_2)} \quad (3.1)$$

dengan:

- W_T = berat spesimen pada waktu T dalam gram hingga 0,1 g,
 W_0 = berat awal spesimen dalam gram hingga 0,1 g,
 L_1 = panjang rata-rata permukaan uji mortar spesimen kubus dalam mm dengan ketelitian 0,5 mm, dan
 L_2 = lebar rata-rata permukaan uji mortar spesimen kubus dalam mm dengan ketelitian 0,5 mm
 A_T = penyerapan air g/100cm²



Gambar 3.13 Konfigurasi Spesimen Selama Pengujian (ASTM C1403)

3.4.5 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan berdasarkan standard ASTM C109/C109M-02 dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* di *Laboratorium Concrete and Building Materials* Jurusan Teknik Sipil ITS. Spesimen kubus dengan dimensi 50x50x50 mm³. Data yang didapatkan secara langsung dari pengujian ini adalah beban gaya maksimum yang dapat diterima sampel. Beban maksimum dapat dikalkulasi menjadi kuat tekan dalam satuan MPa.

Persamaan umum yang dipakai untuk menghitung kuat tekan beton adalah:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

Dengan:

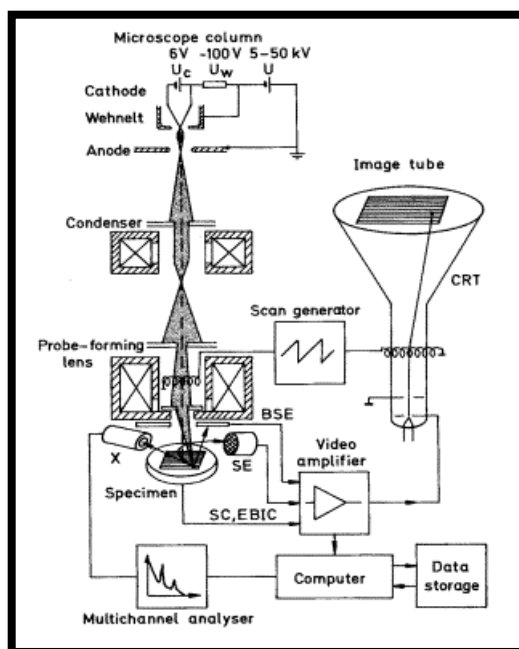
σ = kuat tekan beton (MPa)

P = beban maksimum (N)

A = luas bidang tekan (mm²)

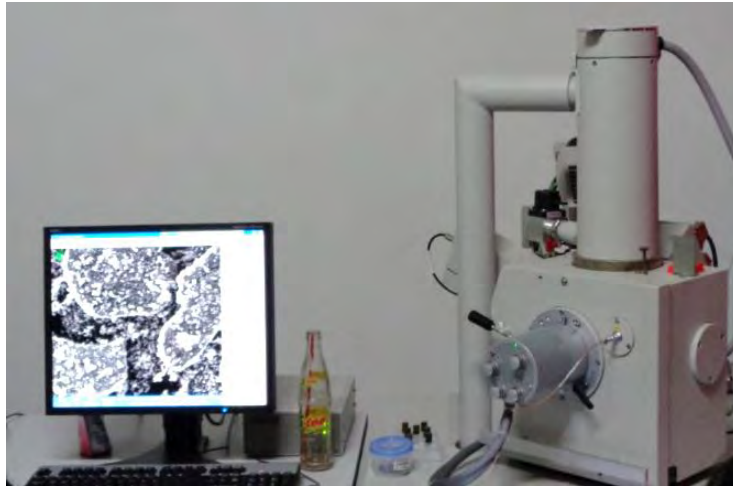
3.4.6 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope adalah jenis mikroskop yang menampilkan Gambar morfologi sampel dengan memanfaatkan sinar elektron berenergi tinggi dalam pola *raster scan*. Cara kerja SEM adalah dengan menembakkan elektron dari *electron gun* lalu melewati *condensing lenses* dan pancaran elektron akan diperkuat dengan sebuah kumparan, setelah itu elektron akan difokuskan ke sampel oleh lensa objektif yang ada di bagian bawah. Pantulan elektron yang mengenai permukaan sampel akan ditangkap oleh *backscattered electron detector* dan *secondary electron detector* yang kemudian diterjemahkan dalam bentuk Gambar pada *display*. Mekanisme kerja SEM ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Mekanisme Kerja SEM (Reimer, 1998)

Dalam penelitian ini, SEM digunakan untuk mengkarakterisasi morfologi serta ukuran partikel dari material geopolimer terak Fe-Ni yang telah *dicuring* pada temperatur 80°C selama 24 jam. Mesin SEM yang akan digunakan seperti pada Gambar 3.15 tersedia di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS.



Gambar 3.15 *Scanning Electron Microscope* (SEM)

3.4.7 Uji Statistik (Varian Standar Deviasi dan Standar Error)

Penentuan varian dan standar error (SE) bertujuan untuk menentukan keakuratan data dari sampel yang dipilih dan diuji. Semakin kecil nilai SE, maka semakin mengindikasikan sampling yang bagus. Secara umum SE adalah standar deviasi dari rata-rata sampel. Adapun persamaan perhitungan variansi, standar deviasi dan standar error dapat dilihat pada persamaan (3.3-3.5) berikut:

$$\text{Variansi } (s^2) = \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)} \quad (3.3)$$

Dimana :

x = sampel ke 1,2,3 dst.

\bar{x} = rata-rata sampel

n = jumlah sampel

$$\text{Standar deviasi } (s) = \sqrt{s^2} \quad (3.4)$$

$$\text{Standar error (SE)} \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (3.5)$$

Penentuan standar eror digunakan untuk menentukan nilai penyimpangan pada masing-masing data hasil pengujian.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

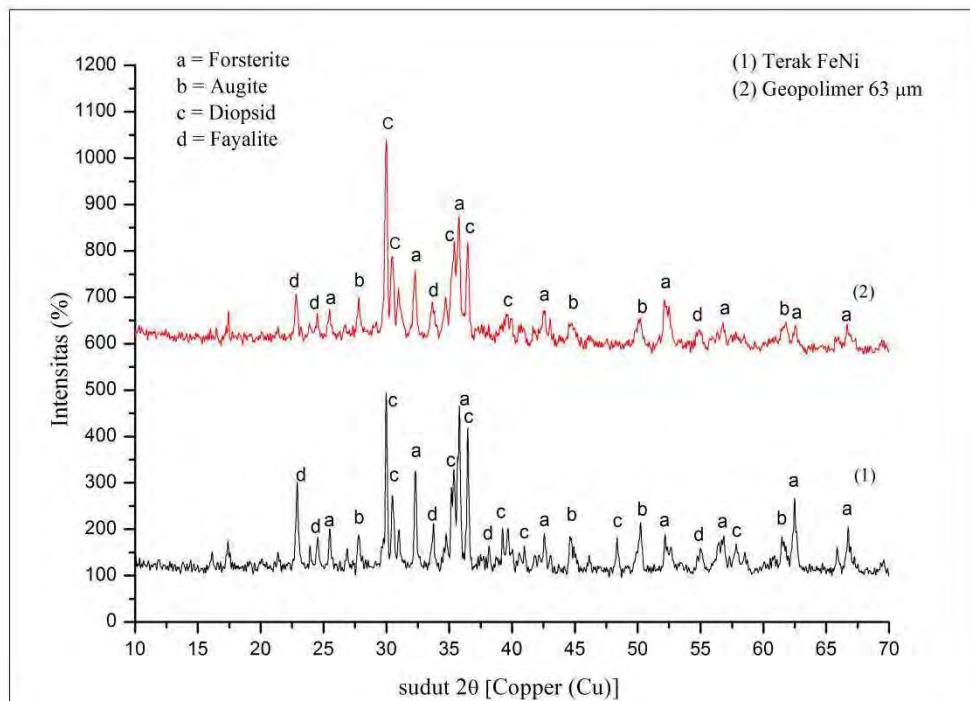
Pada Bab ini membahas tentang hasil karakterisasi dan pengujian sifat fisik-mekanik terak Fe-Ni dan geopolimer. Karakterisasi senyawa menggunakan XRD PanAnalysis dan karakterisasi unsur menggunakan EDAX. Pengujian FTIR juga dilakukan untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat didalam terak Fe-Ni dan geopolimer. Hasil pengujian karakterisasi terak Fe-Ni ini akan dibandingkan dengan hasil karakterisasi geopolimer semen terak Fe-Ni. Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui struktur geopolimer yang terbentuk. Pengujian serapan air dan kekuatan tekan dilakukan untuk mengetahui kemampuan fisik-mekanik dari geopolimer semen terak Fe-Ni.

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Pengujian XRD Terak Fe-Ni dan Geopolimer

Terak Fe-Ni yang diperoleh dari hasil peleburan pada *blast furnace* berupa bongkahan dihaluskan hingga ukuran tertentu. Pengujian XRD untuk mengetahui senyawa-senyawa yang terkandung didalamnya. Pengujian XRD dilakukan pada sampel terak Fe-Ni dan geopolimer semen terak Fe-Ni dengan ukuran 63 μm yang menampilkan sifat fisik-mekanik terbaik. Gambar 4.1 menampilkan puncak-puncak serapan pada sudut 2θ .

Senyawa-senyawa yang terkandung didalam terak Fe-Ni dan geopolimer sebagian besar berupa mineral dari senyawa *fayalite* (Fe_2SiO_4) (PDF No. 720460) dan *forsterite* (MgSiO_4) (PDF No. 870689) dari grup *olivine*, senyawa *augite* ($\text{Ca, Na(Mg, Fe, Al, Ti)(Si, Al)}_2\text{O}_6$) (ICCD 01-088-0849) dari grup *pyroxene*, dan *diopside* ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) (PDF No. 831821) dari grup *pyroxene*.

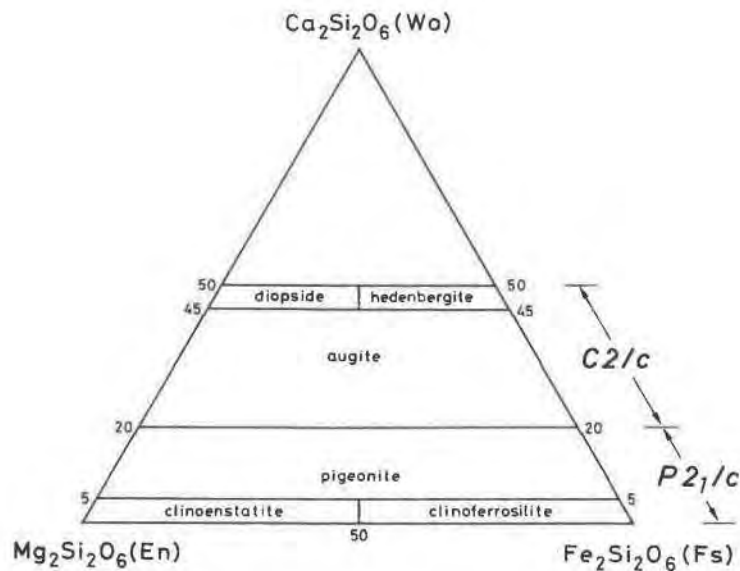


Gambar 4.1 Pola XRD (a) Terak Fe-Ni; (b) Geopolimer Semen Terak Fe-Ni 63 µm

Senyawa dari grup *olivine* berupa batuan mineral berwarna hijau dan abu-abu yang terdiri dari kelarutan padat *forsterite* dan *fayalite*. *Fayalite* memiliki kandungan Fe yang tinggi dan *forsterite* memiliki kandungan Mg yang tinggi. *Forsterite* dan *fayalite* memiliki struktur kristal *orthorhombic*. *Forsterite* dapat terbentuk dari metamorfosis batu kapur yang tidak murni mengikuti persamaan sebagai berikut:



Senyawa augit sangat dekat dengan seri *diopside-hedenbergite* dengan penambahan Al dan substitusi minor Na $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$. Senyawa *augite* memiliki struktur kristal *monoclinic*. Perbedaan antara *augite* dan *pigeonite* didalam struktur utama *pyroxenes* Ca-Mg-Fe adalah jarak grup $\text{C}2/c$ dan $\text{P}2_1/c$ (Gambar 4.2). Kesenjangan kelarutan *augite* dan *pigeonite* dan banyak *pyroxene* adalah 15-25% Wo yang dibuktikan dengan campuran yang terpisah. Augite yang kurang dari 25% Wo sering disebut sebagai *Calcic Augite* (Morimoto, 1988).



Gambar 4.2 Barisan Komposisi clinopyroxenes Ca-Mg-Fe (Morimoto, 1988)

Senyawa *diopside* merupakan mineral dari grup *pyroxene* dengan struktur kristal *monoclinic*. Membentuk kelarutan padat dengan *hedenbergite* ($\text{FeCaSi}_2\text{O}_6$) dan *augite*, dalam bentuk kelarutan padat parsial dengan *orthopyroxene* dan *pigeone*.

4.1.2 Pengujian EDAX Terak Fe-Ni

Karakterisasi terak Fe-Ni untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung didalamnya menggunakan pengujian EDAX. Data hasil pengujian EDAX yang terdapat Tabel 4.1 menampilkan kandungan unsur-unsur yang utama didalam terak Fe-Ni berdasarkan perhitungan rata-rata beberapa pengujian. Kandungan Si pada terak Fe-Ni sebesar 21,87% berat, Al sebesar 5,25% berat. Si dan Al merupakan senyawa yang berperan penting dalam pembentukan geopolimer yang akan membentuk ikatan Al-O-Si.

Tabel 4.1 Unsur-unsur yang Terkandung dalam Terak Fe-Ni % Berat

<i>Unsur</i>	<i>% Massa</i>
<i>O K</i>	37,48
<i>MgK</i>	12,23
<i>AlK</i>	5,25
<i>SiK</i>	21,87
<i>CaK</i>	16,06
<i>FeK</i>	7,11
<i>Total</i>	100,00

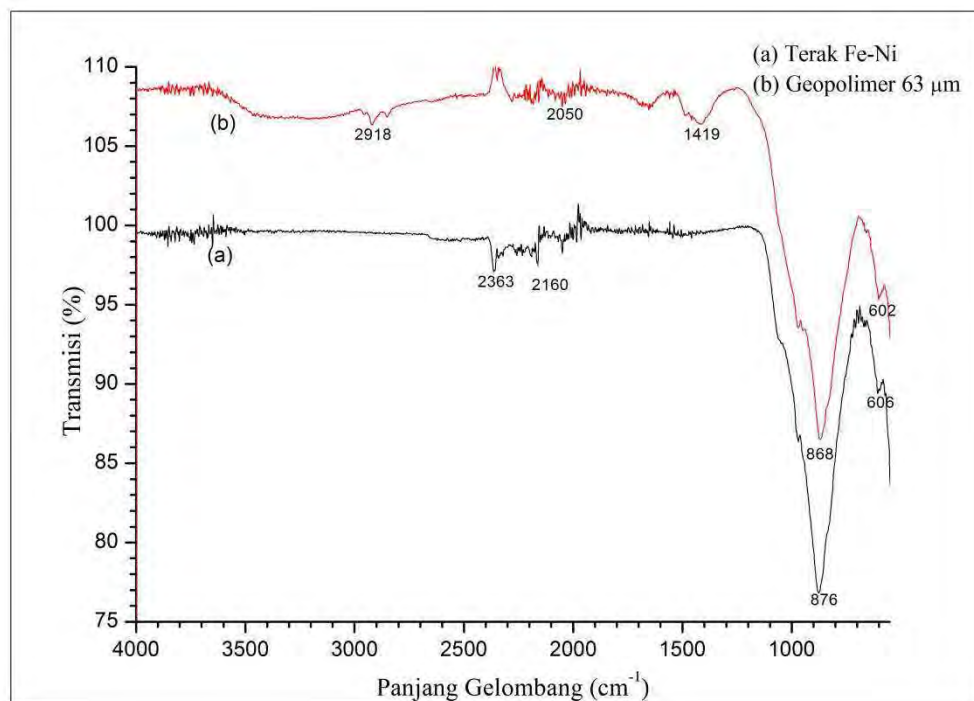
Unsur-unsur yang telah diketahui terdapat didalam terak Fe-Ni selanjutnya dilakukan konversi kedalam bentuk oksidanya yang terdapat pada Tabel 4.2. Pada terak Fe-Ni kandungan oksida yang terbesar adalah SiO_2 43,07% berat yang merupakan senyawa oksida yang berperan dalam sintesis geopolimer. Senyawa Al_2O_3 yang juga menjadi bahan yang penting dalam sintesis geopolimer sebanyak 9,13% berat. Senyawa Al_2O_3 dalam terak Fe-Ni termasuk cukup besar jika dibandingkan dengan referensi penelitian yang lain sebesar 6, 19% berat (Yang, 2014) dan hampir mendekati penelitian Maragkos (2008) sebesar dari 10,11% berat.

Tabel 4.2 Komposisi Oksida Terak Fe-Ni

Komposisi Oksida Terak Fe-Ni	% Berat
<i>MgO</i>	18,68
<i>Al₂O₃</i>	9,13
<i>SiO₂</i>	43,07
<i>CaO</i>	20,69
<i>FeO</i>	8,42
<i>Total</i>	100,0

4.1.3 Pengujian FTIR Terak Fe-Ni dan Geopolimer

Pengujian FTIR untuk mengetahui gugus fungsi terak Fe-Ni dan geopolimer semen terak Fe-Ni ukuran 63 μm yang memiliki sifat fisik-mekanik yang terbaik yang dapat dilihat pada Gambar 4.3. Hasil FTIR terak Fe-Ni menampilkan puncak-puncak pita serapan pada panjang gelombang 606 cm^{-1} , 876 cm^{-1} , 2160 cm^{-1} dan 2363 cm^{-1} sedangkan FTIR geopolimer semen terak Fe-Ni menampilkan puncak-puncak pita serapan pada panjang gelombang 602 cm^{-1} , 868 cm^{-1} , 1419 cm^{-1} , 2050 cm^{-1} , dan 2918 cm^{-1} .



Gambar 4.3 Spektrum FTIR (a) Terak Fe-Ni dan (b) Geopolimer Terak Fe-Ni Ukuran 63 μm

4.1.4 Produk Geopolimer Semen Terak Fe-Ni

Geopolimer semen telah dibuat dengan variasi ukuran partikel terak Fe-Ni. Geopolimer semen terak Fe-Ni dengan ukuran partikel 106 dan 90 μm (Gambar 4.4) memiliki tampilan yang agak gelap dengan butiran partikel yang masih terasa kasar setelah dibentuk sebagai sampel geopolimer. Secara penampakan fisik memiliki kepadatan yang baik.



Gambar 4.4 Sampel Geopolimer Semen 106 μm ($15_{1,2,3}$) dan 90 μm ($18_{1,2,3}$) (80°C , 24 jam)

Geopolimer semen terak Fe-Ni dengan ukuran partikel 75 dan 63 μm pada Gambar 4.5 memiliki tampilan yang agak lebih terang dengan warna keabu-abuan. Tidak terdapat butiran partikel yang terlepas setelah dibentuk menjadi geopolimer atau dengan kata lain mengalami pengikatan yang baik. Berat sampel rata-rata yang lebih besar dibandingkan dengan sampel ukuran 106 dan 90 μm menandakan kepadatan yang lebih tinggi pada sampel yang lebih halus.

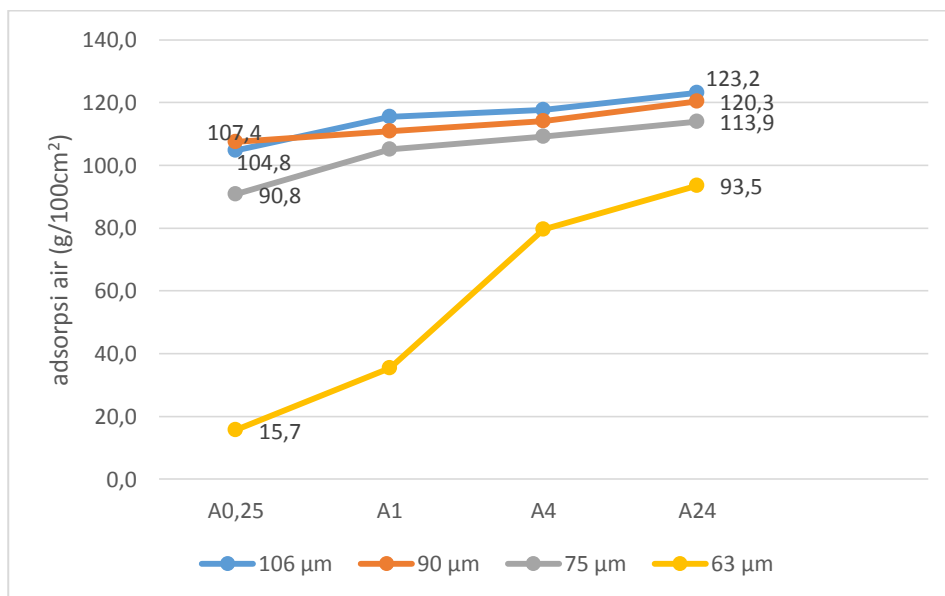


Gambar 4.5 Sampel Geopolimer Semen 75 μm ($20_{1,2,3}$) dan 63 μm ($23_{1,2,3}$) (80°C , 24 jam)

4.1.5 Pengujian Serapan Air Geopolimer Semen Fe-Ni

Pengujian serapan air dilakukan untuk mengetahui kemampuan dari geopolimer semen dalam menyerap air. Kemampuan penyerapan air geopolimer semen akan berpengaruh pada kekuatan dari geopolimer semen. Semakin besar serapan air menunjukkan semakin besar permeabilitas dan porositas pada sampel. Berdasarkan pengujian serapan air (ASTM C1403) diperoleh data penyerapan air semen geopolimer seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.6.

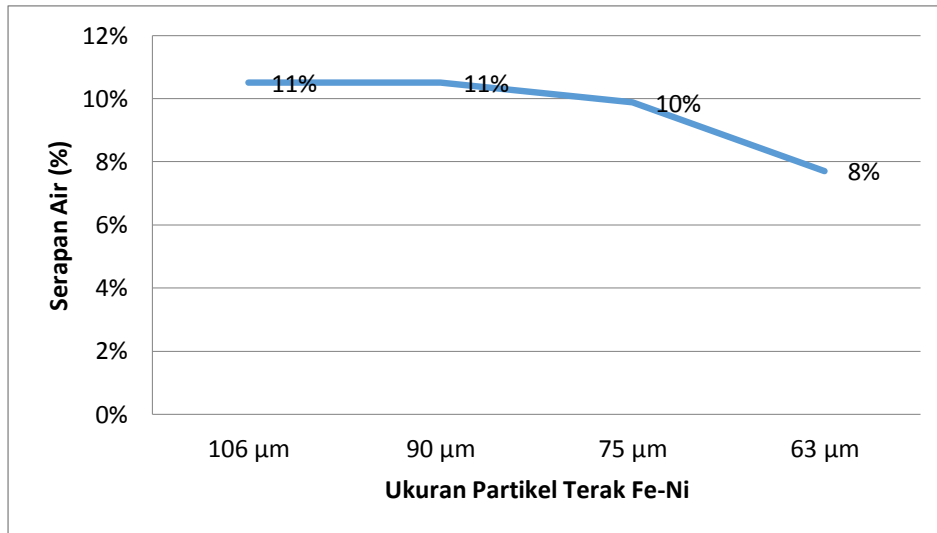
Serapan air paling tinggi terdapat pada sampel geopolimer dengan ukuran 106 μm sebesar 123,2 $\text{g}/100\text{cm}^2$ dan serapan paling kecil pada sampel geopolimer dengan ukuran 63 μm sebesar 93,5 $\text{g}/100\text{cm}^2$. Berdasarkan data pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.5 ukuran partikel terak Fe-Ni yang semakin kecil menurunkan serapan air pada terak Fe-Ni. Diketahui bahwa ukuran partikel terak Fe-Ni mempengaruhi serapan air dari geopolimer semen terak Fe-Ni.



Gambar 4.6 Grafik Absorpsi Air Geopolimer Semen dengan Variasi Ukuran Partikel

Serapan air pada produk geopolimer ditampilkan dalam satuan $\text{g}/100\text{cm}^2$ juga ditampilkan dalam satuan persentase berat yang bertambah (% berat). Gambar 4.7 menampilkan serapan air produk geopolimer setelah dilakukan perendaman selama 24 jam. Ukuran partikel 63 μm memiliki serapan air paling

kecil (8% berat) dibandingkan dengan ukuran partikel lainnya (106, 95, dan 75 μ m). Serapan air mulai mengalami penurunan pada ukuran partikel 75 μ m dan terjadi penurunan yang cukup besar pada ukuran partikel 63 μ m. Berdasarkan Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa semakin kecil ukuran partikel terak Fe-Ni semakin rendah serapan air pada produk geopolimer.

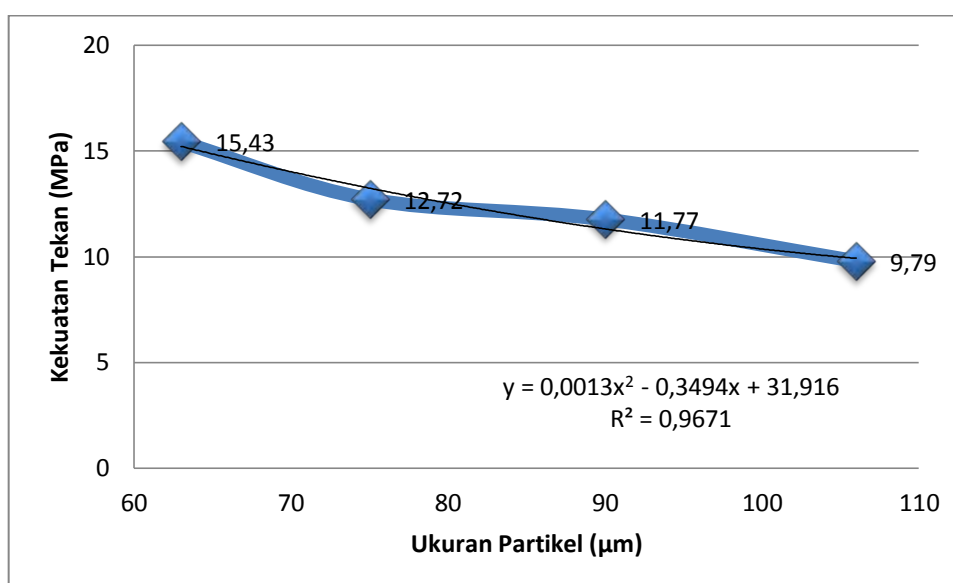


Gambar 4.7 Grafik Persentase Absorpsi Air Geopolimer Semen Setelah 24 Jam

4.1.6 Pengujian Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan merupakan parameter yang paling penting dalam menjelaskan sifat semen. Parameter-parameter yang lain selalu dihubungkan dengan kekuatan tekan. Kekuatan tekan produk geopolimer dipengaruhi oleh aktivator dan kondisi curing. Selain itu ukuran partikel bahan geopolimer juga mempengaruhi kekuatan tekan, mikrostruktur dan ketahanan yang disebabkan matrix geopolimer yang terbentuk. Produk geopolimer dihasilkan dengan mencampurkan aktivator dengan terak Fe-Ni yang akan menghasilkan reaksi geopolimerisasi. Setelah tercampur secara homogen, produk dicetak dan dioven selama 24 jam temperatur 80°C yang selanjutnya dilakukan uji kekuatan tekan pada umur 28 hari. Kekuatan tekan geopolimer semen terak Fe-Ni dengan variasi ukuran dapat dilihat pada Gambar 4.8, nilai yang ditampilkan merupakan rata-rata dari tiga sampel setiap ukuran.

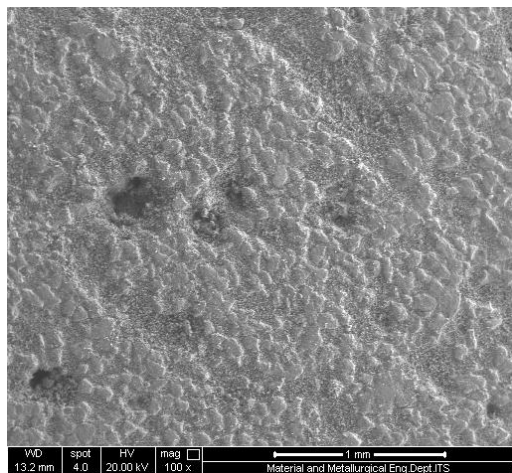
Ukuran partikel terak Fe-Ni mempengaruhi kekuatan tekan geopolimer yang dihasilkan. Kekuatan tekan meningkat secara linier terhadap ukuran partikel terak Fe-Ni. Semakin kecil ukuran partikel terak Fe-Ni semakin tinggi kekuatan tekan geopolimer. Berdasarkan pengujian, kekuatan tekan geopolimer dengan variasi ukuran partikel 106, 90, 75, dan 63 μm berturut-turut 9,79; 11,77; 12,72; 15,43 MPa. Kekuatan tekan produk geopolimer terak Fe-Ni yang dihasilkan dapat ditampilkan dalam persamaan logaritmik yaitu $y = -0,0013x^2 - 0,3494x + 137,7$ dan $R^2 = 0,9671$.



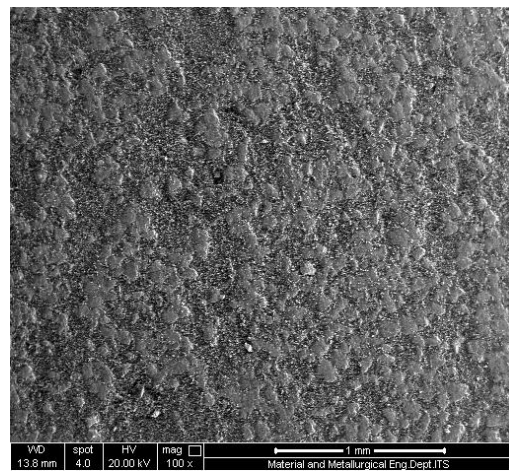
Gambar 4.8 Kekuatan Tekan Geopolimer Semen Terak Fe-Ni Umur 28 Hari

4.1.7 Pengamatan Mikrostruktur Geopolimer

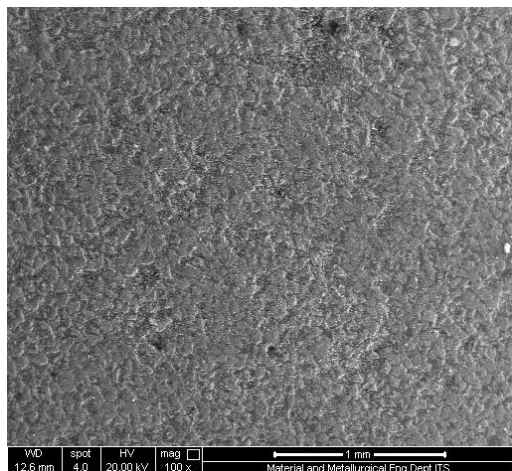
Produk geopolimer terak Fe-Ni yang telah dilakukan uji kekuatan tekan selanjutnya dilakukan pengamatan makroskopis dan mikroskopis menggunakan SEM. Permukaan sampel geopolimer dihaluskan dengan amplas no. 100 dan no. 300. Pengamatan SEM dilakukan dengan perbesaran 100x, 1000x dan 5000x untuk setiap sampel. Gambar 4.9 menampilkan permukaan sampel geopolimer dengan perbesaran 100x. Pada perbesaran 100x permukaan sampel tidak tampak berbeda. Kehalusan permukaan terlihat dari masing-masing sampel dengan permukaan yang paling halus merupakan ukuran partikel yang paling kecil.



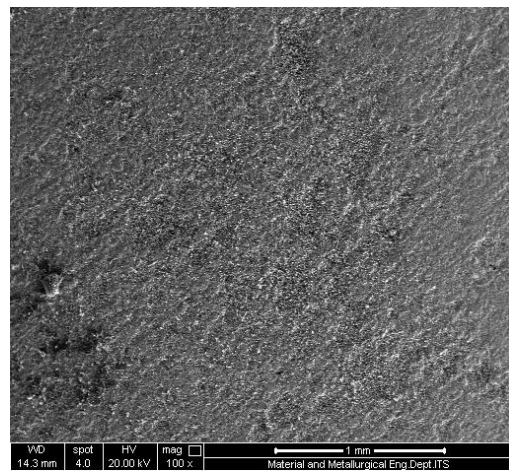
(a)



(b)



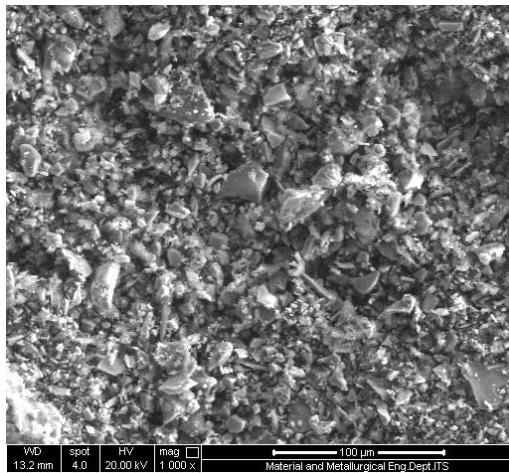
(c)



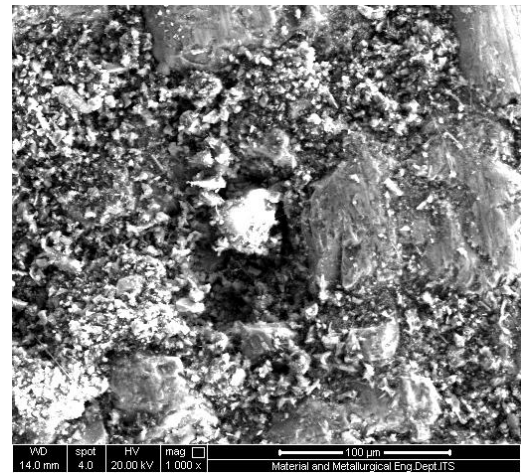
(d)

Gambar 4.9 Permukaan Sampel Geopolimer dengan Perbesaran 100x (a) 106 μm ; (b) 90 μm ; (c) 75 μm ; (d) 63 μm .

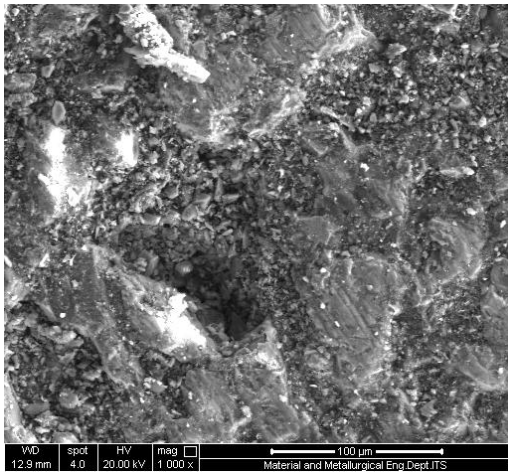
Geopolimer semen terak Fe-Ni diperbesar 1000x (Gambar 4.10) memperlihatkan partikel-partikel yang tidak bereaksi selama proses geopolimerisasi. Partikel terak Fe-Ni yang tidak bereaksi dengan aktivator akan menghasilkan ikatan *adhesive* yang lemah. Sedangkan partikel terak Fe-Ni yang lebih kecil akan mengalami reaksi geopolimerisasi dan menghasilkan fase semi kristal aluminosilikat. Fase semi kristal aluminosilikat yang terbentuk akan meningkatkan kekuatan tekan dari geopolimer. Pada ukuran partikel terak Fe-Ni 63 μm terlihat semi kristal fase aluminosilikat yang terbentuk berupa laminar-laminar.



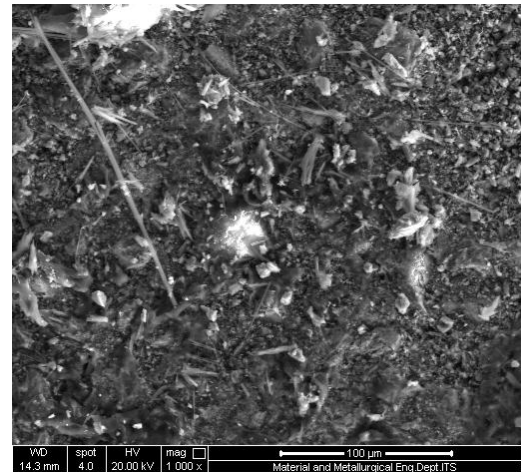
(a)



(b)



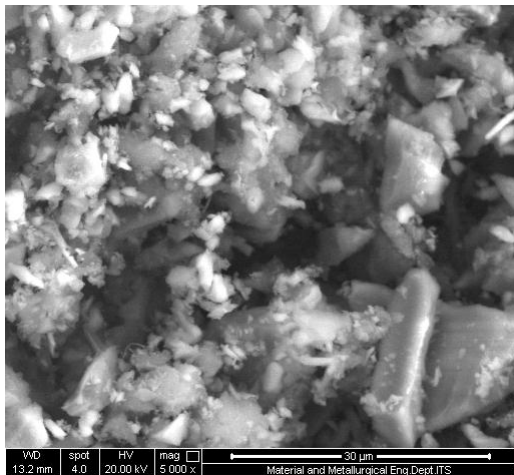
(c)



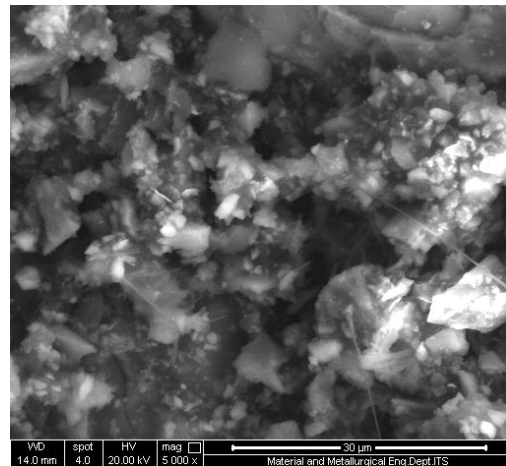
(d)

Gambar 4.10 Permukaan Sampel Geopolimer dengan Perbesaran 1000x (a) 106 μm ; (b) 90 μm ; (c) 75 μm ; (d) 63 μm .

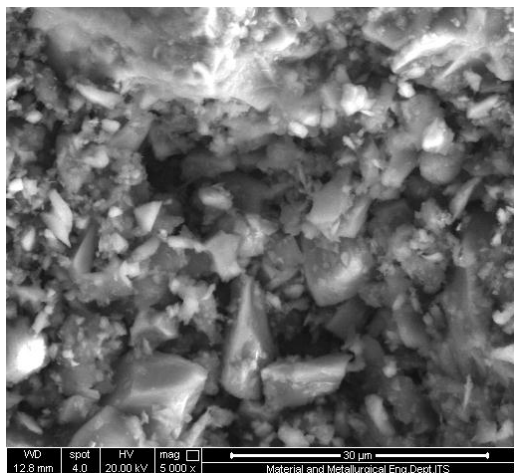
Geopolimer semen terak Fe-Ni pada perbesaran 5000x (Gambar 4.11) terlihat secara jelas kristal-kristal zeolit dan partikel-partikel terak Fe-Ni yang tidak bereaksi. Pada ukuran partikel 106 μm tidak terlihat terbentuknya fase kristal aluminosilikat, pada ukuran partikel 90 μm dan 75 μm terbentuk sangat sedikit fase semi kristal. Ukuran partikel 63 μm menampilkan adanya fase semi kristal aluminosilikat yang terbentuk. Fase semi kristal ini tersusun secara berselang-seling satu sama lain dan juga terdapat partikel terak Fe-Ni yang tidak bereaksi.



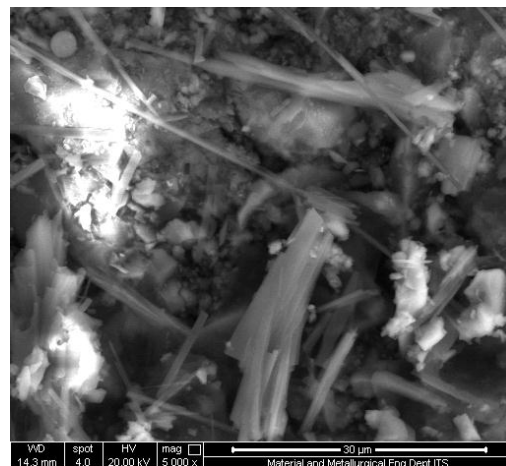
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.11 Permukaan Sampel Geopolimer dengan Perbesaran 5000x (a) 105 μm ; (b) 90 μm ; (c) 75 μm ; (d) 63 μm .

4.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil karakterisasi dan pengujian yang dilakukan pada terak Fe-Ni dan geopolimer semen terak Fe-Ni, selanjutnya dilakukan pembahasan mengenai fenomena yang terjadi pada produk geopolimer yang dihasilkan. Untuk mengetahui kaitan antara ukuran partikel yang digunakan terhadap karakteristik dan sifat fisik-mekanik geopolimer semen terak Fe-Ni yang dihasilkan.

Karakterisasi berupa pengujian XRD pada terak Fe-Ni dan geopolimer ukuran 63 μm dilakukan untuk mengetahui kandungan mineral yang terdapat didalam terak Fe-Ni dan geopolimer. Berdasarkan pengujian XRD pada Gambar 4.1 diketahui bahwa senyawa-senyawa yang menjadi sumber silika berupa

senyawa *forsterite*, *fayalite* dan *diopside*, sedangkan senyawa yang menjadi sumber alumina berupa senyawa *augite*. Senyawa-senyawa tersebut yang menjadi bahan utama sintesis geopolimer.

Pada pengujian spektra FTIR pada terak Fe-Ni dan geopolimer semen menampilkan puncak-puncak spektra yang menunjukkan pembentukan struktur geopolimer. Puncak-puncak serapan FTIR dari terak Fe-Ni dan geopolimer semen terak Fe-Ni dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Spektra FTIR Terak Fe-Ni dan Geopolimer Semen Ukuran 63 μm

Spektra Terak Fe-Ni (cm^{-1})	Spektra Geopolimer Semen (cm^{-1})	Vibrasi Senyawa (cm^{-1})
606	602	500-620 (SiO_4 <i>bending</i>)
876	868	830-1010 (SiO_4 <i>stretching</i>)
-	1419	1450 (CO_3^{2-} asimetri)
2160 dan 2363	2050 dan 2918	>1600 (regangan -OH dan tekukan H-O-H)

Puncak serapan pada 500 cm^{-1} sampai 620 cm^{-1} merupakan getaran SiO_4 *bending* dan pada 830 sampai 1010 cm^{-1} merupakan getaran SiO_4 *stretching* (Kharaziha, 2009). Pada terak Fe-Ni getaran SiO_4 *bending* berada pada panjang gelombang 606 cm^{-1} dan geopolimer pada 602 cm^{-1} . Getaran SiO_4 *stretching* terak Fe-Ni pada panjang gelombang 876 cm^{-1} dan geopolimer pada panjang gelombang 868 cm^{-1} . Puncak serapan yang sangat tinggi pada $830\text{-}1010\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan struktur utama yang terdapat pada terak Fe-Ni dan geopolimer. Keberadaan dan peningkatan transmisi pada gugus SiO_4 menandakan terjadinya pembentukan ikatan geopolimerik pada produk geopolimer.

Puncak serapan yang rendah pada kisaran 1450 cm^{-1} merupakan vibrasi asimetri CO_3^{2-} . Laju reaksi yang tinggi memerlukan kandungan alkali yang lebih banyak sehingga meninggalkan sedikit alkali yang berkarbonasi (CO_3^{2-}) (Zang didalam Ma dkk, 2016). Keberadaan puncak serapan asimetri CO_3^{2-} juga disebabkan karena terjadinya pembentukan kalsium karbonat oleh reaksi antara kalsium hidroksida dan karbon dioksida pada atmosfer. Pada pita serapan yang lebih besar dari 1600 cm^{-1} menampilkan getaran molekul air berupa regangan (-OH) dan tekukan (H-O-H). Adanya kandungan air didalam terak Fe-Ni dan

geopolimer dikarenakan hasil sampingan dari reaksi geopolimer berupa senyawa H_2O .

Setelah dilakukan karakterisasi terak Fe-Ni dan geopolimer semen terak Fe-Ni yang mengkonfirmasi keberadaan gugus SiO_4 pada geopolimer dan adanya gugus CO_3^{2-} yang menandakan adanya kation Na^+ yang bereaksi dengan udara. Selanjutnya diamati pengaruh ukuran partikel terhadap sifat fisik-mekanik geopolimer semen. Ukuran partikel memainkan peran penting dalam reaksi geopolimerisasi. Semakin kecil ukuran partikel semakin aktif partikel dalam bereaksi dengan larutan alkali yang akan meningkatkan kekuatan tekan geopolimer. Ukuran partikel yang kecil menyebabkan luasan permukaan yang bereaksi dengan aktivator semakin besar. Sehingga semakin banyak reaksi geopolimerisasi yang terjadi. Peningkatan reaksi geopolimerisasi akan meningkatkan kekuatan tekan geopolimer. Hal ini dapat dilihat pada hasil kekuatan tekan yang semakin meningkat dengan ukuran partikel yang semakin kecil. Kekuatan tekan maksimum yang dapat dicapai pada penelitian ini adalah 15,4 MPa dengan ukuran partikel 63 μm . Kekuatan tekan geopolimer terak Fe-Ni senilai 15,4 MPa merupakan kekuatan tekan pasta geopolimer. Kekuatan tekan tersebut telah cukup untuk memenuhi standar penggunaan sebagai *loadbearing concrete masonry* (ASTM C90-090).

Kekuatan tekan geopolimer dipengaruhi oleh rasio partikel yang mengalami reaksi menjadi fase gel Al-Si dan yang tidak mengalami reaksi, distribusi ukuran dan kekerasan dari partikel Al-Si yang tidak bereaksi, derajat kristalisasi dari amorfus geopolimer seperti reaksi dipermukaan antara fase gel dan partikel Al-Si yang tidak terlarut. Xu dkk (2000) menjelaskan bahwa kekerasan mineral sumber juga berpengaruh pada kekuatan akhir geopolimer hal ini disebabkan karena partikel-partikel yang tidak bereaksi akan terikat pada matrix setelah proses geopolimerisasi. Terdapat 3 hal yang berpengaruh signifikan terhadap kekuatan geopolimer yaitu: (a) tipe alkali; (b) $\%K_2O$ pada mineral sumber; (c) ppm Si didalam larutan.

Weng dkk (2005) menjelaskan bahwa kekuatan tekan geopolimer juga dipengaruhi variasi luas permukaan pada serbuk metakaolin. Serbuk metakaolin dengan luas permukaan yang lebih besar mempercepat proses pembentukan awal

geopolimer dengan meningkatkan laju pelarutan metakaolin pada larutan natrium silikat. Luas permukaan yang lebih besar pada serbuk metakaolin menghasilkan kekuatan tekan yang paling tinggi pada geopolimer, kemungkinan juga disebabkan oleh kandungan aluminat yang tinggi pada matrix geopolimer dan lebih banyaknya mikrostruktur yang homogen. Kemampuan larut aluminat dan distribusi ion $[Al(OH)_4]^-$ diamati memiliki pengaruh yang penting pada sifat geopolimer.

Ukuran partikel yang lebih kecil menghasilkan produk geopolimer yang lebih kompak dan padat yang terlihat dari serapan air yang kecil sebesar 8% pada ukuran partikel 63 μm dibandingkan dengan ukuran partikel yang lainnya. Kandungan air pada saat pencetakan spesimen geopolimer dan pembentukan fase hidrasi juga mempengaruhi kekuatan geopolimer. Kelebihan air selama proses tersebut akan berdifusi dan menguap ketika produk geopolimer dipanaskan pada suhu tinggi dan meninggalkan pori dan retakan, dan juga akan terbentuk fase yang mirip garam pada permukaan produk geopolimer yang merupakan kelebihan natrium hidroksida yang bereaksi secara atmosferik. Kramar dkk (2015) meneliti tentang mekanikal dan mikrostruktur geopolimer abu terbang rendah kalsium menyimpulkan bahwa kekuatan tekan menurun secara signifikan ketika ratio *water/solid* ditingkatkan. Porosity pada geopolimer juga mengalami peningkatan akibat dari ratio *water/solid* yang ditingkatkan.

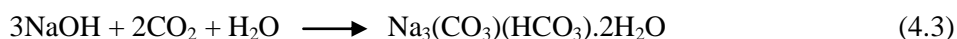
Pada penelitian lain tentang geopolimer Yang dkk. (2014), menggunakan campuran fly ash dan terak blast furnace dalam pembuatan geopolimer. *Water absorption* yang paling kecil 0,3% pada geopolimer dengan perbandingan campuran 50% terak. Banyaknya serapan air pada geopolimer menunjukkan banyaknya pori pada struktur geopolimer.

Ken dkk. (2015) meneliti penyerapan air pada geopolimer dengan memberikan tekanan 0,5-15 MPa pada saat pencetakan sampel. Diperoleh bahwa terjadi peningkatan serapan air seiring dengan peningkatan tekanan yang diberikan, hal ini disebabkan oleh banyaknya NaOH yang ikut keluar selama penekanan. Reaksi geopolimer mengalami gangguan akibat penekanan tersebut sehingga menghasilkan porositas pada matrix geopolimer.

Pengamatan mikrostruktur dilakukan untuk mengetahui fase yang dihasilkan dan porositas pada produk geopolimer. Berdasarkan pengamatan mikroskopis geopolimer memiliki fase kristal amorfus dan memiliki bentuk menyerupai struktur zeolit. Mikrostruktur geopolimer semen terak Fe-Ni memiliki perbedaan dibandingkan dengan mikrostruktur geopolimer abu terbang. Terak memiliki bentuk partikel angular sedangkan abu terbang memiliki partikel lingkaran (*spherical*).

Gambar 4.9-4.11 menampilkan mikrostruktur dari geopolimer semen terak Fe-Ni dengan perbesaran 100, 1000 dan 5000x. Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa masih banyak partikel terak Fe-Ni yang tidak bereaksi terutama pada ukuran partikel 106, 90, dan 75 μm . Terak Fe-Ni yang bereaksi dan membentuk geopolimer terlihat seperti jarum-jarum pada ukuran partikel 63 μm yang merupakan semi kristalin aluminosilikat. Pada ukuran partikel 90 dan 75 μm sangat sedikit terak Fe-Ni yang bereaksi sedangkan pada ukuran partikel 106 μm tidak ditemui partikel yang mengalami reaksi geopolimeriasi. Partikel terak Fe-Ni yang tidak bereaksi akan menjadi matrix dengan ikatan yang lemah dibandingkan dengan terak Fe-Ni yang bereaksi. Geopolimer semen terak Fe-Ni yang dihasilkan pada temperatur 80°C, 24 jam dan umur 28 hari, menampilkan keberadaan fase garam berupa partikel putih yang terperangkap pada permukaan produk geopolimer. Partikel-partikel putih yang terlihat dari hasil SEM merupakan produk sisa alkali yang berkarbonasi.

Komnitas dkk (2007) menganalisa fase garam yang berada pada produk geopolimer terak Fe-Ni rendah kalsium dan menganalisa bahwa fase tersebut merupakan thermonatrite, trona, calcite, sodalite dan quartz. Thermonatrite, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ merupakan anggota dari grup mineral soda, therminatrite dibentuk dari karbonasi atmosferik natrium hidroksida berlebih berdasarkan reaksi 4.2. Grup mineral lain berupa trona $\text{Na}_3(\text{CO}_3)(\text{HCO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, natrite $\text{g-Na}_2\text{CO}_3$, nahcolite NaHCO_3 , natron $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dan wegscheiderite $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{NaHCO}_3$. trona dihasilkan berdasarkan reaksi (4.3).

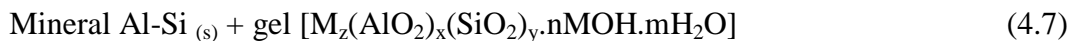
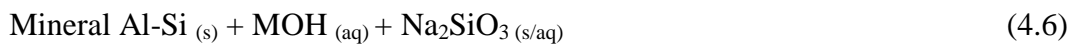


Fase garam yang terbentuk pada permukaan geopolimer semen terak Fe-Ni juga dihasilkan dari kation Na^+ dari natrium silikat yang tidak berikatan dengan struktur geopolimer. Kation Na^+ dari natrium silikat tersebut bereaksi dengan udara membentuk natrium karbonat dan natrium bikarbonat berdasarkan reaksi (4.4 dan 4.5).



Semakin banyak partikel terak Fe-Ni yang bereaksi maka akan semakin banyak struktur geopolimer seperti jarum (Gambar 4.11d) yang akan meningkatkan kekuatan tekan produk geopolimer semen. Peningkatan terak Fe-Ni yang bereaksi dipengaruhi oleh ukuran partikel. Semakin kecil partikel terak Fe-Ni akan memperluas permukaan yang kontak dengan larutan aktivator alkali. Peningkatan kontak akan meningkatkan laju reaksi dan pelarutan Al dan Si dari material sumber (terak Fe-Ni).

Dari segi reaksi produk geopolimer terak Fe-Ni mengalami reaksi geopolimerisasi yang melibatkan reaksi antara sumber Al-Si (Terak Fe-Ni) dan larutan aktivator (natrium hidroksida & natrium silikat). Reaksi geopolimerisasi ini berjalan dengan cepat dan sulit untuk memisahkan reaksi menjadi beberapa tahapan. Skema reaksi polikondensasi pada geopolimer dari mineral sebagai berikut:

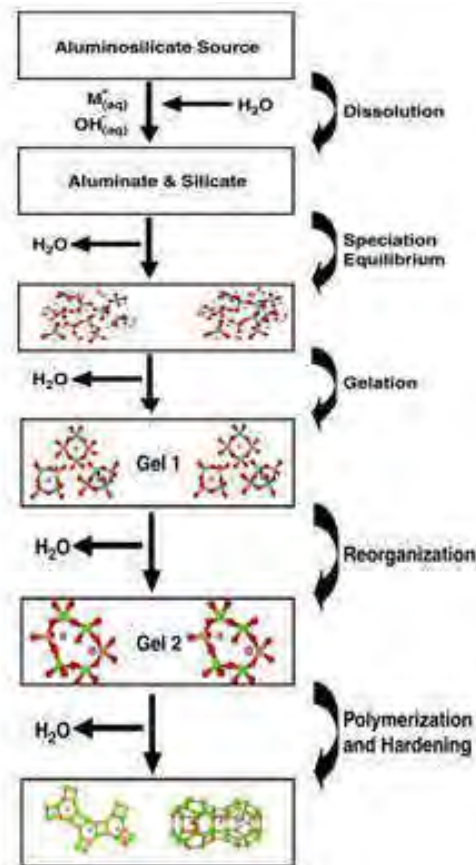


Pada reaksi 4.6 dan 4.8 kandungan mineral Al dan Si yang digunakan tergantung pada ukuran partikel, kelarutan material Al-Si dan konsentrasi larutan alkali. Ukuran partikel yang halus meningkatkan kelarutan dan mengakibatkan lebih banyak partikel aluminosilikat yang terlarut menjadi gel. Partikel padat aluminosilikat tidak semua berubah dari fase solid menjadi fase gel.

Padatan aluminosilikat tidak terlarut yang terkandung didalam geopolimer dapat menjadi penguat (*reinforcement*) pada matrix geopolimer. Pembentukan gel $[M_z(AlO_2)_x(SiO_2)_y.nMOH.mH_2O]$ merupakan tahapan penting geopolimerisasi. Padatan aluminosilikat bereaksi dengan larutan MOH dan terbentuk lapisan gel pada permukaan padatan aluminosilikat. Fase gel yang mengeras mengikat partikel aluminosilikat sebagai binder (Xu, 2000).

Pada reaksi geopolimerisasi, konsentrasi silikat yang tinggi terutama pada saat penambahan natrium silikat diduga meningkatkan pembentukan pasangan ion yang mana menghasilkan rantai oligomer silikat yang lebih panjang sebagai kompleks Al-O-Si (geopolimer prekursor). Makin panjang rantai oligomer silikat yang terbentuk makin banyak terbentuk geopolimer prekursor (McCormick didalam Xu, 2000).

Glukhovsky didalam Li dkk (2010) mengajukan mekanisme reaksi geopolimer yang umum dari sumber Si-Al dan aktivator alkali. Mekanisme geopolimer berdasarkan model Glukhovsky terdiri dari *destruction-coagulation-condensation-crystallization*. Tahap pertama berupa pemutusan ikatan kovalen Si-O-Si dan Al-O-Si, yang terjadi ketika pH larutan meningkat dan mengubah grup tersebut menjadi fase koloid. Tahap kedua fase koloid yang terakumulasi selanjutnya bereaksi satu sama lain membentuk struktur koagulat. Tahap ketiga struktur koagulat tersebut membentuk struktur kondensat dan selanjutnya tahap keempat terjadinya kristalisasi. Gambar 4.12. konsep sederhana reaksi geopolimerisasi antara sumber aluminosilikat dan larutan alkali.



Gambar 4.12. Skema Reaksi Aktivasi Alkali Aluminosilikat (Provis, 2005)

Berdasarkan analisa hasil karakterisasi terak Fe-Ni dan geopolimer, pengujian sifat fisik-mekanik dan pengamatan mikrostruktur dari geopolimer semen terak Fe-Ni dapat ditarik kesimpulan bahwa terbentuknya struktur geopolimer dengan adanya peningkatan transmisi gugus silikat (SiO_4) yang menandakan terbentuknya rantai geopolimer Si-O-Al-O-Si-O-, terbentuknya gugus karbonat (CO_3^{2-}) yang menandakan terbentuknya garam pada produk geopolimer dan gugus hidroksil (-OH) yang menandakan adanya produk sisa reaksi polikondensasi geopolimer berupa molekul air. Selanjutnya, ukuran partikel yang digunakan mempengaruhi sifat fisik-mekanik dari geopolimer semen terak Fe-Ni yang dikonfirmasi dengan terjadinya peningkatan kekuatan tekan seiring dengan ukuran partikel yang semakin kecil. Penyerapan air yang mengalami penurunan seiring dengan ukuran partikel yang semakin kecil menandakan semakin kompak dan sedikitnya pori pada produk geopolimer semen terak Fe-Ni.

Pengamatan mikrostruktur menampilkan semi kristalin aluminosilikat pada produk geopolimer ukuran 63 μm , adanya garam pada permukaan geopolimer dan terdapat partikel yang tidak bereaksi yang menjadi penguat (*reinforce*) pada produk geopolimer.

LAMPIRAN

A. Perhitungan Kebutuhan Terak Fe-Ni dan Larutan Aktivator

Terak Fe-Ni yang digunakan untuk setiap cetakan binder ukuran $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ (3 sampel) adalah sebanyak 850 g. Berdasarkan ratio S/L 5,4 g/mL dihitung kebutuhan larutan aktivator sebagai berikut:

$$\text{Ratio S/L} = 5,4 \text{ g/mL}$$

$$\begin{aligned}\text{Volume larutan aktivator} &= \frac{850 \text{ g}}{5,4 \text{ g/mL}} \\ &= \mathbf{157,4 \text{ mL}}\end{aligned}$$

Diketahui bahwa volume larutan yang dibutuhkan untuk setiap cetakan sebesar 157,4 mL. Berdasarkan ratio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2,5$ yang digunakan, maka kebutuhan Na_2SiO_3 dan NaOH sebagai berikut:

$$\text{Ratio } \frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 2,5$$

$$a = \text{Na}_2\text{SiO}_3$$

$$b = \text{NaOH}$$

$$a/b = 2,5; a + b = 157,4$$

$$a = 157,4 - b$$

$$\frac{157,4 - b}{b} = 2,5$$

$$157,4 - b = 2,5b$$

$$157,4 = 2,5b + b$$

$$b = \frac{157,4}{3,5} = 44,9 \approx 45$$

$$\mathbf{b = NaOH = 45 \text{ mL}}$$

$$a = 157,4 - b$$

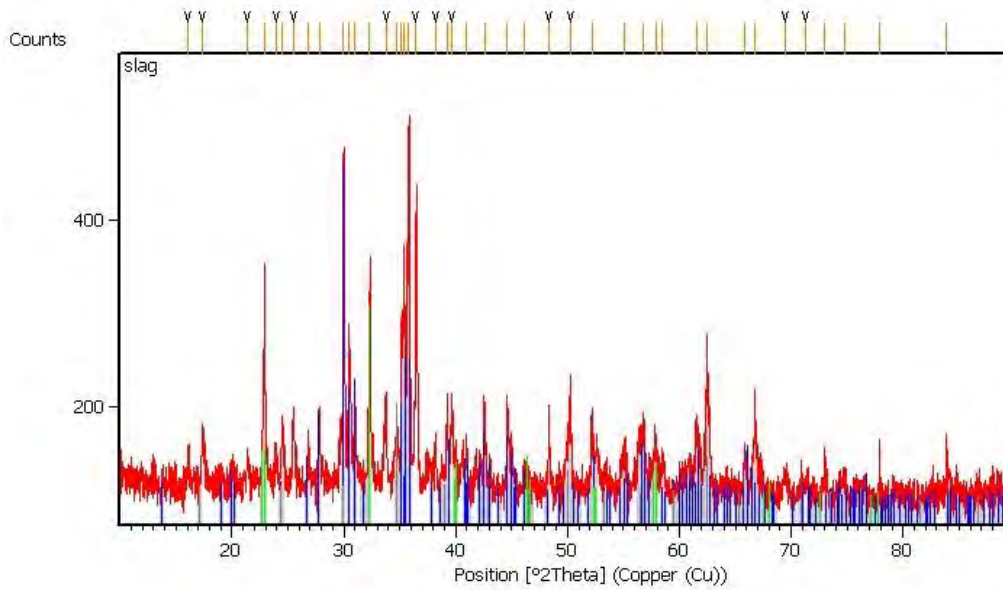
$$a = 157,4 - 45$$

$$a = 112,4$$

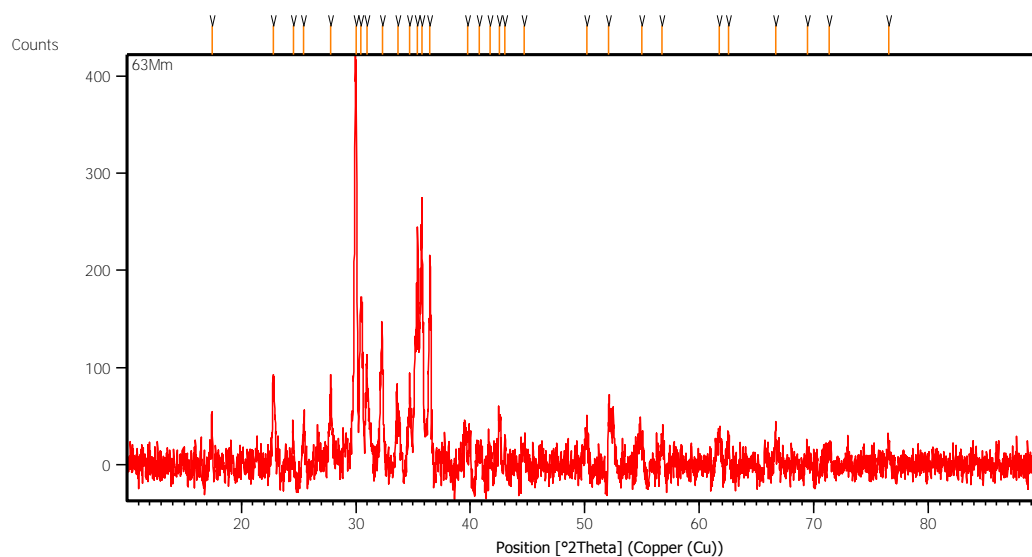
$$\mathbf{a = Na_2SiO_3 = 112,4 \text{ mL}}$$

B. Hasil Pengujian X-ray Diffraction (XRD)

B1. Terak Ferronikel



B2. Geopolimer Terak Ferronikel Ukuran Partikel 63 µm (*curing* 24 jam, 80°C)



C. Referensi Senyawa Kimia Pola XRD Terak dan Geopolimer Fe-Ni

C1. ICCD 01-088-0849 untuk Augite

Name and formula

Reference code:	01-088-0849
Mineral name:	Augite
Compound name:	Magnesium Aluminum Iron Calcium Silicate Hydroxide Titanium
Common name:	Magnesium aluminium iron iron(III) chromium titanium calcium sodium manganese catena-alumosilicate *
Empirical formula:	$\text{CaMgO}_6\text{Si}_2$
Chemical formula:	$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti}) (\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Na}, \text{Mg}) (\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$

Crystallographic parameters

Crystal system:	Monoclinic
Space group:	C2/c
Space group number:	15
a (Å):	9.7470
b (Å):	8.8830
c (Å):	5.2880
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	106.1500
Gamma (°):	90.0000
Calculated density (g/cm ³):	3.37
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	439.78
Z:	4.00
RIR:	1.23

Status, subfiles and quality

Status:	Alternate Pattern
Subfiles:	Common Phase Forensic ICSD Pattern Inorganic Mineral
Quality:	Blank (B)

Comments

ANX:	AB166C167D333X1000
Creation Date:	11/19/2008
Modification Date:	1/19/2011
ANX:	AB166C167D333X1000
Analysis:	Al0.333 Ca0.839 Cr0.001 Fe0.24 Mg0.7 Mn0.005 Na0.056 O6 Si1.755 Ti0.071
Formula from original source:	(Mg0.684 Al0.088 Fe0.156 Cr0.001 Ti0.071) (Ca0.839 Na0.056 Mg0.016 Fe0.084 Mn0.005) (Si1.755 Al0.245 O6)
ICSD Collection Code:	85160

Calculated Pattern Original Remarks: Sample from core of a phenocryst
Significant Warning: Density calculated using chemical formula and reported structure differ by 3.026%
Wyckoff Sequence: f4 e3(C12/C1)
Unit Cell Data Source: Single Crystal.

References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*
Structure: Salviulo, G., Secco, L., Antonini, P., Piccirillo, E.M.,
Mineral. Mag., **61**, 423, (1997)

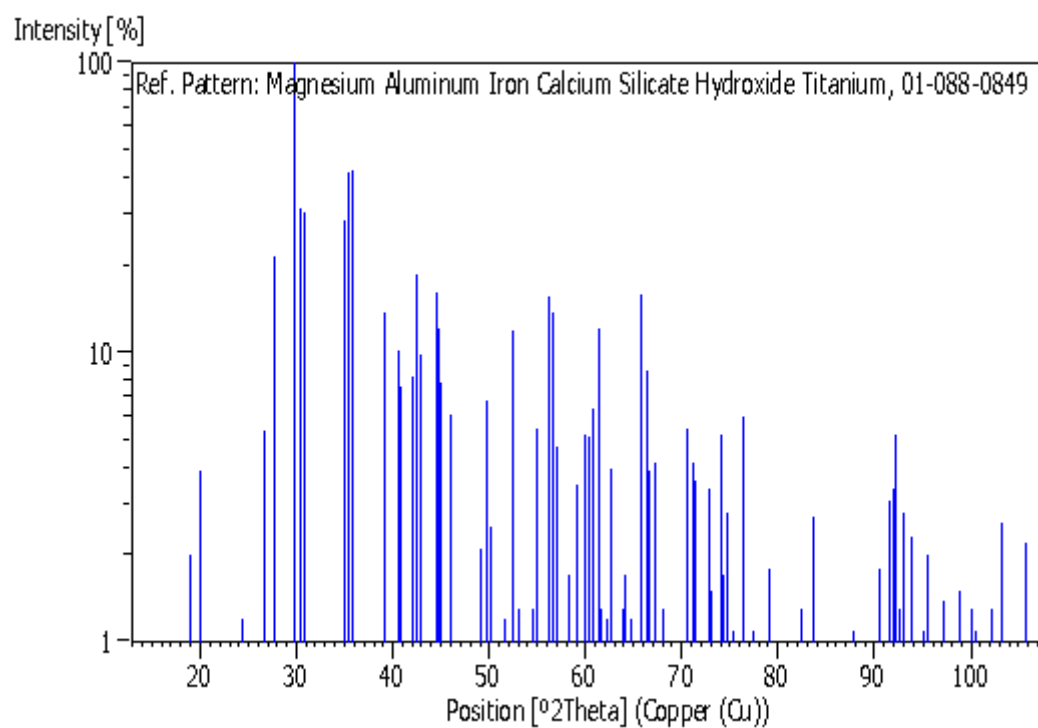
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]	No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	6.44400	13.731	1.0	38	4	2	1	1.77110	51.561	1.2
2	2	0	0	4.68120	18.942	2.0	39	1	5	0	1.74540	52.378	12.0
3	0	2	0	4.44150	19.975	3.9	40	-5	1	2	1.72530	53.035	1.3
4	1	1	1	3.66270	24.281	1.2	41	-1	1	3	1.72050	53.195	0.2
5	0	2	1	3.34350	26.640	5.4	42	3	1	2	1.71350	53.429	1.0
6	2	2	0	3.22200	27.664	21.5	43	-1	5	1	1.67770	54.663	1.3
7	-2	2	1	2.99220	29.836	100.0	44	0	4	2	1.67180	54.872	5.3
8	3	1	0	2.94440	30.332	31.6	45	-3	1	3	1.66920	54.965	5.5
9	-3	1	1	2.89870	30.822	30.5	46	-2	2	3	1.63300	56.291	15.5
10	1	3	0	2.82320	31.667	0.7	47	-5	3	1	1.62320	56.661	13.8
11	-1	3	1	2.56050	35.016	28.7	48	1	5	1	1.62320	56.661	13.8
12	0	0	2	2.53970	35.312	41.9	49	4	4	0	1.61100	57.129	4.7
13	2	2	1	2.51190	35.716	42.6	50	5	1	1	1.59080	57.923	0.1
14	1	3	1	2.38420	37.699	0.4	51	0	2	3	1.58260	58.252	1.7
15	4	0	0	2.34060	38.429	0.9	52	5	3	0	1.58260	58.252	1.7
16	3	1	1	2.29900	39.152	13.7	53	6	0	0	1.56040	59.162	3.5
17	0	4	0	2.22210	40.566	10.2	54	3	5	0	1.54400	59.854	5.2
18	1	1	2	2.22210	40.566	10.2	55	-6	0	2	1.53330	60.315	5.1
19	-2	2	2	2.21090	40.780	1.9	56	4	0	2	1.52290	60.770	6.4
20	0	2	2	2.20470	40.900	7.6	57	-1	3	3	1.50890	61.395	12.1
21	3	3	0	2.14800	42.030	8.2	58	3	3	2	1.50470	61.585	1.3
22	-3	3	1	2.13010	42.400	18.5	59	-4	2	3	1.50470	61.585	1.3
23	-4	2	1	2.10730	42.881	9.8	60	-4	4	2	1.49610	61.978	0.2
24	4	2	0	2.07070	43.678	0.9	61	2	4	2	1.49030	62.246	1.2
25	0	4	1	2.03480	44.489	16.1	62	0	6	0	1.48050	62.704	4.0
26	-4	0	2	2.02450	44.728	12.2	63	-1	5	2	1.47400	63.013	0.9
27	2	0	2	2.01020	45.064	7.9	64	-3	3	3	1.47400	63.013	0.9
28	-1	3	2	1.97220	45.981	6.1	65	4	4	1	1.45730	63.819	1.3
29	-2	4	1	1.94710	46.609	0.9	66	-5	1	3	1.45730	63.819	1.3
30	-5	1	1	1.89610	47.940	0.4	67	-6	2	2	1.44930	64.213	1.7
31	3	3	1	1.85510	49.068	2.1	68	4	2	2	1.44060	64.648	1.2
32	-4	2	2	1.84210	49.437	0.6	69	5	3	1	1.41920	65.745	15.8
33	5	1	0	1.83220	49.723	6.8	70	2	6	0	1.41160	66.144	1.0
34	2	2	2	1.83220	49.723	6.8	71	-3	5	2	1.40810	66.330	8.7
35	-3	3	2	1.82090	50.052	0.2	72	1	5	2	1.40490	66.500	3.9
36	1	3	2	1.81400	50.256	2.5	73	1	3	3	1.40110	66.704	0.7
37	2	4	1	1.79440	50.844	0.6	74	2	2	3	1.39300	67.143	4.2

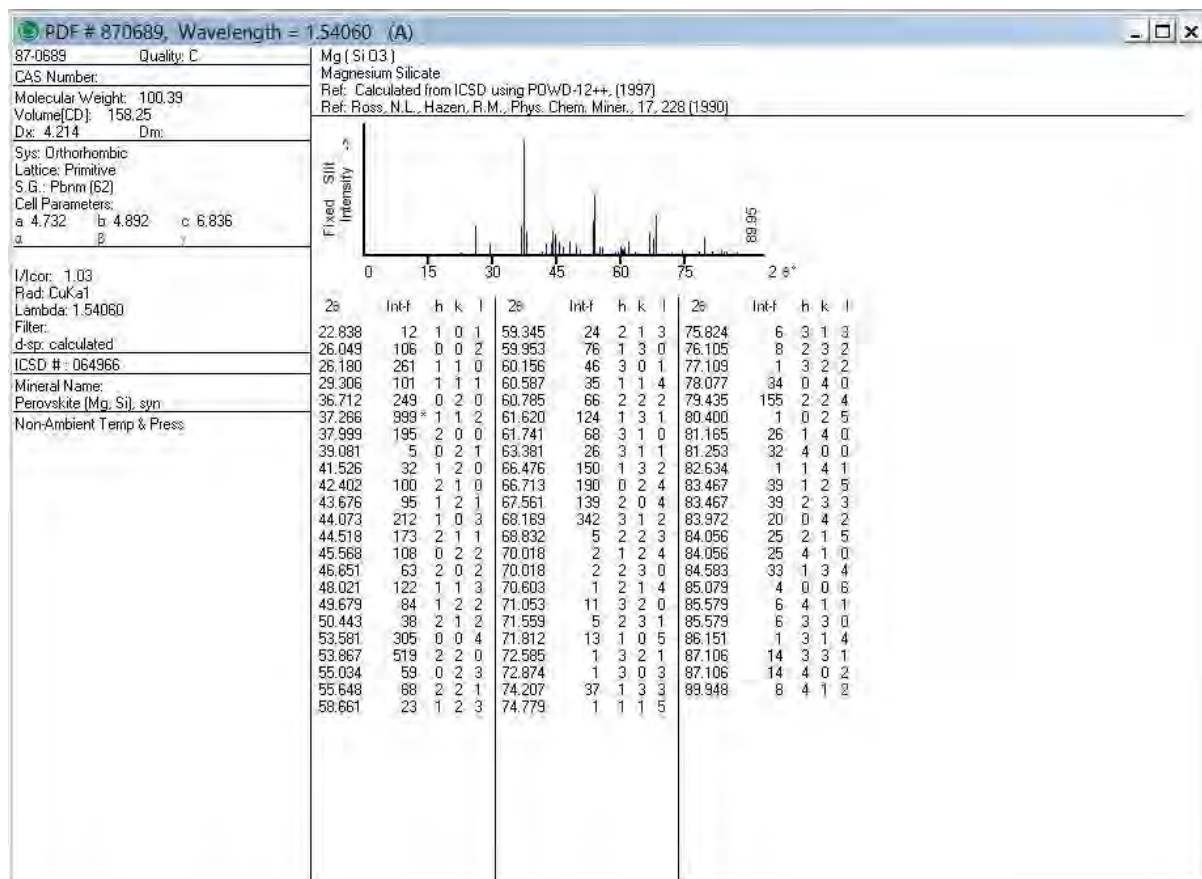
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]	No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
75	-2	4	3	1.37740	68.007	1.3	131	-5	3	4	1.12830	86.111	0.3
76	-7	1	1	1.37550	68.114	0.9	132	7	3	1	1.12240	86.675	0.1
77	0	4	3	1.34640	69.796	1.0	133	1	3	4	1.12240	86.675	0.1
78	2	6	1	1.33280	70.614	5.5	134	3	7	1	1.11980	86.927	0.1
79	-7	1	2	1.33280	70.614	5.5	135	0	6	3	1.11450	87.444	0.4
80	6	2	1	1.32410	71.148	4.2	136	2	2	4	1.11110	87.780	1.1
81	5	1	2	1.32410	71.148	4.2	137	0	8	0	1.11110	87.780	1.1
82	-2	0	4	1.32150	71.309	3.6	138	-4	4	4	1.10550	88.340	0.3
83	-5	3	3	1.32150	71.309	3.6	139	0	4	4	1.10230	88.663	0.1
84	-6	4	1	1.31080	71.982	0.2	140	5	1	3	1.10230	88.663	0.1
85	-5	5	1	1.31080	71.982	0.2	141	-7	5	1	1.09580	89.329	0.1
86	-3	1	4	1.29630	72.915	3.4	142	-6	6	1	1.09400	89.516	0.3
87	-1	1	4	1.29370	73.086	1.5	143	0	8	1	1.08530	90.430	1.8
88	5	5	0	1.28880	73.409	0.1	144	-8	2	3	1.08530	90.430	1.8
89	0	6	2	1.27900	74.065	5.2	145	2	8	0	1.08040	90.955	0.3
90	-2	6	2	1.27900	74.065	5.2	146	-7	1	4	1.07560	91.476	0.5
91	-4	0	4	1.27460	74.364	1.7	147	-7	5	2	1.07390	91.663	3.1
92	0	0	4	1.26980	74.693	2.8	148	6	6	0	1.07390	91.663	3.1
93	-2	2	4	1.26700	74.886	0.3	149	3	5	3	1.07080	92.005	3.4
94	-4	6	1	1.25990	75.381	1.1	150	-2	8	1	1.07080	92.005	3.4
95	-7	3	1	1.25990	75.381	1.1	151	3	1	4	1.06850	92.261	5.2
96	4	4	2	1.25600	75.656	0.9	152	7	5	0	1.06850	92.261	5.2
97	4	6	0	1.25120	75.998	0.2	153	-9	1	2	1.06500	92.653	1.3
98	-5	5	2	1.24990	76.091	0.3	154	-6	6	2	1.06500	92.653	1.3
99	3	5	2	1.24540	76.416	6.0	155	-5	7	1	1.06210	92.981	2.8
100	-1	7	1	1.23140	77.445	1.1	156	4	6	2	1.06210	92.981	2.8
101	-7	3	2	1.22690	77.782	0.5	157	7	1	2	1.05970	93.255	1.0
102	-3	5	3	1.22690	77.782	0.5	158	-3	5	4	1.05450	93.855	2.3
103	2	4	3	1.22520	77.911	0.6	159	-8	4	2	1.05450	93.855	2.3
104	-4	2	4	1.22520	77.911	0.6	160	5	7	0	1.05050	94.322	0.8
105	5	3	2	1.22050	78.268	0.6	161	-3	1	5	1.04890	94.511	0.7
106	3	3	3	1.22050	78.268	0.6	162	6	4	2	1.04890	94.511	0.7
107	-7	1	3	1.21730	78.513	0.7	163	8	2	1	1.04640	94.808	0.7
108	1	7	1	1.21020	79.064	1.8	164	2	8	1	1.04320	95.191	1.1
109	-5	1	4	1.21020	79.064	1.8	165	5	3	3	1.04050	95.517	2.0
110	7	1	1	1.20180	79.726	0.3	166	8	4	0	1.03530	96.153	0.1
111	1	1	4	1.20180	79.726	0.3	167	-1	7	3	1.02810	97.050	1.4
112	-3	3	4	1.19820	80.014	0.4	168	-2	2	5	1.02690	97.202	1.0
113	5	5	1	1.19690	80.118	0.4	169	3	7	2	1.02690	97.202	1.0
114	-8	0	2	1.19690	80.118	0.4	170	2	4	4	1.01950	98.150	0.3
115	2	6	2	1.19210	80.507	0.1	171	-2	8	2	1.01800	98.345	0.3
116	6	0	2	1.19000	80.678	0.1	172	0	8	2	1.01740	98.423	0.3
117	1	5	3	1.18500	81.090	0.3	173	-3	7	3	1.01740	98.423	0.3
118	3	7	0	1.17500	81.926	0.3	174	-4	2	5	1.01620	98.580	0.3
119	4	6	1	1.17500	81.926	0.3	175	-9	3	1	1.01450	98.803	1.5
120	-8	2	1	1.17360	82.045	0.8	176	3	3	4	1.01160	99.187	0.3
121	-3	7	1	1.17360	82.045	0.8	177	-8	0	4	1.01160	99.187	0.3
122	8	0	0	1.17030	82.327	1.3	178	-9	3	2	1.00880	99.562	0.1
123	-6	0	4	1.15460	83.696	2.7	179	-4	8	1	1.00730	99.764	0.2
124	6	2	2	1.14950	84.152	0.6	180	4	0	4	1.00510	100.062	1.3
125	2	0	4	1.14750	84.333	0.2	181	-5	5	4	1.00510	100.062	1.3
126	-1	7	2	1.14400	84.651	0.6	182	7	5	1	1.00240	100.431	1.1
127	-7	3	3	1.13560	85.425	0.6	183	1	5	4	1.00240	100.431	1.1
128	-5	5	3	1.13560	85.425	0.6	184	5	7	1	0.99830	100.998	0.9
129	8	2	0	1.13170	85.790	0.3	185	-3	3	5	0.99490	101.474	0.1
130	-2	6	3	1.13170	85.790	0.3	186	1	7	3	0.99190	101.899	0.3

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
187	0	2	5	0.98980	102.199	1.3
188	6	2	3	0.98980	102.199	1.3
189	-2	6	4	0.98610	102.733	0.3
190	-1	3	5	0.98250	103.260	2.6
191	1	1	5	0.97520	104.350	0.1
192	-4	8	2	0.97360	104.593	0.1
193	2	8	2	0.97200	104.838	0.1
194	-10	0	2	0.9704	105.083	0.8
195	8	0	2	0.96620	105.736	2.2
196	-9	3	3	0.96620	105.736	2.2
197	0	6	4	0.96410	106.066	0.8
198	-5	3	5	0.96410	106.066	0.8

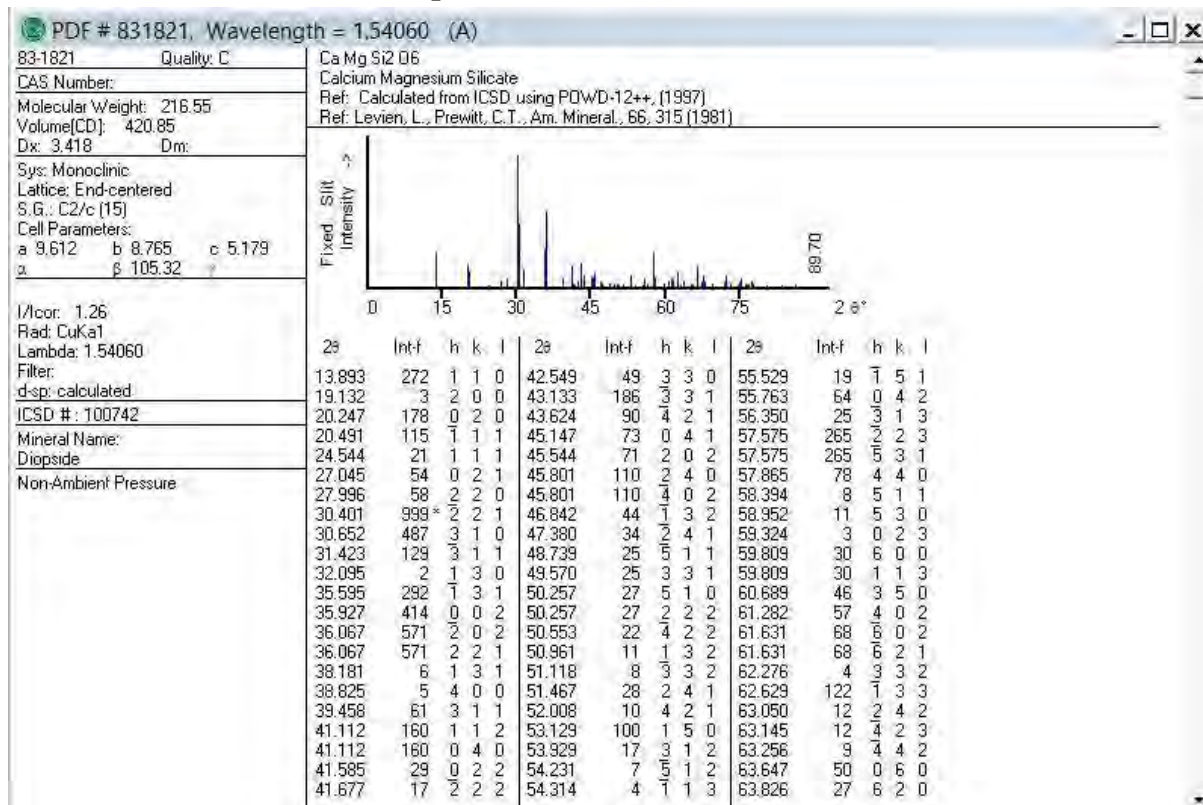
Stick Pattern



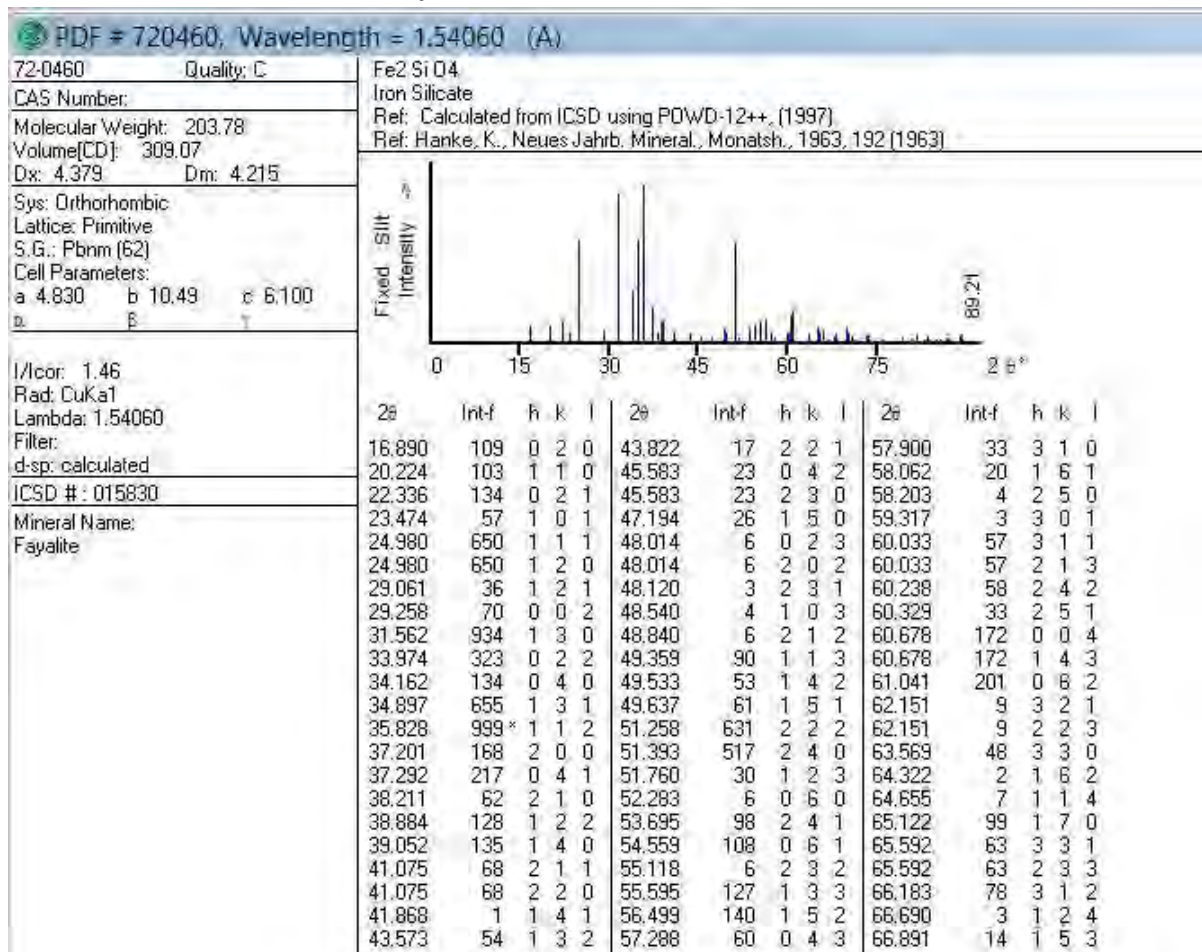
C2. PDF No. 870689 untuk Forsterit



C3. PDF No. 831821 untuk Diopsid



C4. PDF No. 720460 untuk Fayalite



D. Data Pengujian EDAX Terak Fe-Ni

D1. Data Perhitungan Unsur-unsur pada Terak Fe-Ni

<i>Elemen</i>	% Berat Pengulangan ke-							<i>rata-rata</i>
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	
<i>OK</i>	38,96	38,1	38,93	39,68	38,15	33,19	35,33	37,48
<i>MgK</i>	16,65	17,11	12,04	10,07	10,94	9,5	9,29	12,23
<i>AlK</i>	3,67	3,63	6,58	6,76	3,85	5,02	7,24	5,25
<i>SiK</i>	20,88	21,95	22,95	24,42	16,92	24,72	21,26	21,87
<i>CaK</i>	12,45	12,27	14,26	14,91	18,18	22,13	18,23	16,06
<i>FeK</i>	7,4	6,93	5,25	4,16	11,96	5,43	8,64	7,11
<i>Total</i>	100,01	99,99	100,01	100,00	100,00	99,99	99,99	100,00

D2. Data Perhitungan Oksida pada Terak Fe-Ni

Perhitungan oksida pada terak Fe-Ni berdasarkan persamaan berikut:

$$\% \text{ Massa Oksida} = \frac{Mr(\text{Oksida } X)}{Ar(X)} \times \% \text{ massa } X$$

Dimana:

X = Unsur

Mr (Oksida X) = massa molekul relatif oksida X

Ar (X) = massa atom relatif X

Oksida	Mr	% Massa	% Massa Oksida
MgO	40,3	20,3	18,68
Al₂O₃	102	9,9	9,13
SiO₂	60,1	46,8	43,07
CaO	56,1	22,5	20,69
FeO	71,8	9,1	8,42
Total		108,6	100,0

E. Data Pengujian Serapan Air Geopolimer Semen Terak Fe-Ni

Kode Sampel	Massa Sampel (g) setelah pengujian adsorpsi pada waktu (T,jam)					Luasan sampel (mm ²)	adsorpsi air (g/100cm ²)			
	0	0,25	1	4	24		A0.25	A1	A4	A24
151	281,9	307,6	313,8	314,4	316,1	2631,5	97,66	121,22	123,50	129,96
152	275,2	305,1	305,4	305,6	306,5	2647,1	112,95	114,09	114,84	118,24
153	276,5	304,1	306,1	307	308,8	2662,6	103,66	111,17	114,55	121,31
rata-rata	277,9	305,6	308,4	309,0	310,5	2647,1	104,8	115,5	117,6	123,2
181	276,6	304,9	306,5	307,4	309,1	2688,4	105,27	111,22	114,57	120,89
182	270,5	299,2	299,6	300,5	302,1	2688,3	106,76	108,25	111,59	117,55
183	267,6	295,9	296,7	297,4	299,1	2570,5	110,10	113,21	115,93	122,55
rata-rata	271,6	300,0	300,9	301,8	303,4	2649,1	107,4	110,9	114,0	120,3
201	282	309,8	311,7	312,8	314,2	2740	101,46	108,40	112,41	117,52
202	277,5	300,7	304,8	305,9	307	2692,4	86,17	101,40	105,48	109,57
203	283,6	306,4	312	313,1	314,4	2688	84,82	105,65	109,75	114,58
rata-rata	281,0	305,6	309,5	310,6	311,9	2706,8	90,8	105,1	109,2	113,9
231	293,1	297	300,6	311,5	318	2601	14,99	28,84	70,74	95,73
232	282,5	286,1	292,3	303,9	305,9	2550,2	14,12	38,43	83,91	91,76
233	286,1	290,7	296,1	307,5	309,8	2550,2	18,04	39,21	83,91	92,93
rata-rata	287,2	291,3	296,3	307,6	311,2	2567,1	15,7	35,5	79,5	93,5

F. Data Pengujian Kekuatan Tekan Geopolimer Semen Terak Fe-Ni

	Dimensi			Kekuatan Tekan		
Kode Sampel	mm	mm	mm	kgf	kgf/mm²	MPa
151	50	50	50	2388,37	0,95535	9,37
152	50	50	50	2778,73	1,11149	10,90
153	50	50	50	2316,67	0,92667	9,09
rata-rata				2494,59	0,99784	9,79
181	50	50	50	2797,85	1,11914	10,98
182	50	50	50	2567,83	1,02713	10,07
183	50	50	50	3635,93	1,45437	14,26
rata-rata				3000,54	1,20021	11,77
201	50	50	50	3216,82	1,28673	12,62
202	50	50	50	3162,71	1,26508	12,41
203	50	50	50	3347,54	1,33902	13,13
rata-rata				3242,36	1,29694	12,72
231	50	50	50	3384,18	1,35367	13,27
232	50	50	50	4709,81	1,88392	18,47
233	50	50	50	3707,62	1,48305	14,54
rata-rata				3933,87	1,57355	15,43

G. Data Varian, Standar Deviasi dan Standar Error

G1. Penyerapan Air Geopolimer Semen Terak Fe-Ni

Ukuran Partikel (μm)	Serapan Air setelah 24 jam ($\text{g}/100 \text{ cm}^2$)			Varian (s^2)	Standar Deviasi (s)	Standar Error (SE)
106	129,96	118,24	121,31	36,93	6,08	3,51
90	120,89	117,55	122,55	6,49	2,55	1,47
75	117,52	109,57	114,58	16,16	4,02	2,32
63	95,73	91,76	92,93	4,16	2,04	1,18

G2. Kekuatan Tekan Geopolimer Semen Terak Fe-Ni

Ukuran Partikel (μm)	Kekuatan Tekan (MPa)			Varian (s^2)	Standar Deviasi (s)	Standar Error (SE)
106	9,37	10,90	9,09	0,95	0,97	0,56
90	10,98	10,07	14,26	4,86	2,20	1,27
75	12,62	12,41	13,13	0,14	0,37	0,21
63	13,27	18,47	14,54	7,35	2,71	1,57

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian tentang pengaruh ukuran partikel terak Fe-Ni terhadap sifat fisik-mekanik geopolimer telah dilakukan. Ukuran partikel terak Fe-Ni yang digunakan adalah 106, 90, 75, dan 63 μm . Berdasarkan karakterisasi XRD, Senyawa-senyawa yang terkandung didalam terak Fe-Ni berupa senyawa *augite* senyawa *fayalite*, *forsterite*, dan *diopside*. Senyawa-senyawa tersebut merupakan sumber alumina dan silika yang akan bereaksi dengan larutan aktivator alkali. Kandungan Si-Al sebagai sumber pembentuk geopolimer pada terak Fe-Ni sebesar 43,07% SiO_2 dan 9,13% Al_2O_3 . Karakterisasi FTIR menampilkan puncak SiO_2 *bending* dan *stretching* pada 602 dan 868 cm^{-1} yang menandakan terbentuknya struktur rantai geopolimerik Si-O-Al-O-Si-O-. Terbentuknya gugus karbonat (CO_3^{2-}) pada 1419 cm^{-1} yang menandakan terbentuknya garam pada produk geopolimer dan gugus hidroksil (-OH) pada 2050 dan 2918 cm^{-1} yang menandakan adanya produk sisa reaksi polikondensasi geopolimer berupa molekul air.

Produk geopolimer terbaik dengan ukuran partikel terak Fe-Ni 63 μm memiliki kekuatan sebesar 15,4 MPa dan serapan air sebesar 8% berat. Berdasarkan pengamatan SEM geopolimer semen terak Fe-Ni dengan ukuran 63 μm terbentuk struktur seperti jarum yang merupakan semi kristalin aluminosilikat hasil reaksi geopolimerisasi. Partikel yang tidak bereaksi bertindak sebagai penguat (*reinforce*) pada produk geopolimer.

Ukuran partikel terak Fe-Ni yang semakin kecil akan semakin meningkatkan kekuatan tekan dan menurunkan serapan air produk geopolimer yang dihasilkan. Semakin kecil ukuran partikel, semakin luas permukaan dan semakin aktif partikel dalam bereaksi dengan larutan alkali yang akan meningkatkan kontak dan laju reaksi pelarutan Al dan Si dari material sumber (terak Fe-Ni).

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya terdapat beberapa saran yang perlu diperhatikan yaitu:

1. Perlu dilakukan penggunaan ukuran partikel terak Fe-Ni yang lebih kecil dari 63 μm untuk meningkatkan sifat fisik-mekanik yang lebih baik.
2. Perlu dilakukan pengujian FTIR untuk masing-masing ukuran partikel untuk mengetahui perubahan gugus fungsi pada setiap ukuran partikel.
3. Adanya penelitian lebih lanjut dengan memvariasikan suhu dan waktu curing untuk mengetahui pengaruhnya terhadap produk geopolimer yang dihasilkan.
4. Perlunya dilakukan pengujian-pengujian lain berupa ketahanan panas dan ketahanan kondisi ekstrim (asam/basa) pada produk geopolimer terak Fe-Ni.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulkareem, O.A., Al Bakri, A.M.M., Kamarudin, H., Nizar, I.K., Saif.A. (2014). "Effects of Elevated Temperatures On The Thermal Behavior and Mechanical Performance of Fly Ash Geopolymer Paste, Mortar and Lightweight Concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 50, hal. 377-387.
- Ahmed, I.B., Gbor, P.K., Jia, C.Q. (2000). "Aqueous Sulphur Dioxide Leaching of Cu, Ni, Co, Zn and Fe from Smelter Slag in Absence of Oxygen". *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 78, hal. 694-703.
- ASTM, I. (n.d.). *"C 1403-00 Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars"*. West Conshohocken, United States: ASTM International.
- ASTM, I. (n.d.). *"C109/C 109M-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. Or [50-mm] Cube Specimens)"*. West Conshohocken, United States: ASTM International.
- ASTM, I. (n.d.). *"C216-10 Standard Specification for Facing Brick (Solid Masonry Units Made from Clay or Shale)"*. West Conshohocken, United States: ASTM International.
- ASTM, I. (n.d.). *"C90-09 Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units"*. West Conshohocken, United States: ASTM International.
- ASTM, I. (n.d.). *"E11-04 Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes"*. West Conshohocken, United States: ASTM International.
- Barbosa, V. F. F., MacKenzie, K. J. D., Thaumaturgo, C. (2000). "Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers". *International Journal of Inorganic Materials*, Vol. 2(4), hal. 309-317.
- Barbosa, V. F. F., MacKenzie, K. J. D., Thaumaturgo, C. (2000). "Synthesis and Characterisation of Sodium Polysialate Inorganic Polymer Based on Alumina and Silica". *Geopolymer '99 International Conference*. France.
- Bentz, D.P., Garboezi, E.J., Haecker, C.J., Jensen, O.M. (1999). "Effects of Cement Particle Size Distribution on Performance Properties of Portland Cement-Based Materials. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, hal. 1663-1671.
- Binici, H., Aksogan, O., Cagatay, I.H., Tokyay, M., Emsen, E. (2007). "The Effect of Particle Size Distribution on The Properties of Blended Cements Incorporating GGBFS and Natural Pozzolan (NP)". *Powder Technology*, Vol. 177, hal. 140-147.
- Czernin, W. (1980). *"Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers"*. Bauverlag, Wiesbaden: Chemical Publishing Company.
- Davidovits, J. (1991). "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials". *Journal Thermal Analysis*, Vol. 37, hal. 1633-1656.

- Davidovits, J. (1999). "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology". *Proceedings of the 2nd International Conference on Geopolymer '99*, (pp. hal. 9-39). Saint-Quentin, France.
- Davidovits, J. (2002). "Personal Communication on the Process of Making of Geopolymer Concrete".
- Davidovits, J. (2008). *"Geopolymer Chemistry and Applications: A Practical and Scientific Approach to Sustainable Development"*. France: Institut Geopolymer.
- Davidovits, J. S. (1985). *United States Patent No. 4509985*.
- Duxson, P., Provis, J. L., Si, F. (2008). *"Designing Precursors for Geopolymer Cements"*. *The American Ceramic Society*, Vol. 91(12), hal. 3864–3869.
- Feng, D., Provis, J. L., Van Devender, S.J. (2012). "Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part mix Geopolymers". *The American Ceramic Society*, Vol. 95(2), hal. 565-572.
- Ghiasvand, E.; Ramezaniapour, A.A.; Ramezaniapour, A.M. (2014). "Effect of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-pozzolan cement". *Construction and Building Material*, Vol. 53, hal. 547-554.
- Gimeno, D.; Davidovits, J.; Marini, C.; Rocher, P.; Tocco, S.; Cara, S.; Diaz, N.; Segura, C. and Sistu, G. (2003). "Development of silicate-based cement from glassy alkaline volcanic rocks", interpretation of preliminary data related to chemical- mineralogical composition of geologic raw materials. *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio*, Vol. 39, hal. 69-78.
- Gorai, B., Jana, R.K., Premchand. (2003). "Characteristics and Utilization of Cooper Slag-A Review". *Resour. Conserv. Recycl.*, Vol. 39, hal. 299-313.
- Hardjito, D., Rangan, B. V. (2005). *"Development and Properties of Low-calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete"*. Perth, Australia: Research Report GC1 Faculty of Engineering, Curtin University of Technology.
- Izquierdo, M., Querol, X., Davidovits J., Antenucci D. (2009). "Coal Fly Ash-Slab Based Geopolymers: Microstructure and Metal Leaching". *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 166, hal. 561-566.
- Kalinkin, A.M., Kumar, S., Gurevich, B.I., Alex, T.C., Kalinkina, E.V., Tyukavkina, V.V., Kalinnikov, V.T., Kumar, R. (2012). "Geopolymerization behavior of Cu-Ni Slag Mechanically Activated in Air and in CO₂ Atmosphere". *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 112-113, hal. 101-106.
- Ken, P.W., Ramli, M., Ban, C.C. (2015). "An Overview on The Influence of Various Factors on The Properties of Geopolymer Concrete Derived from Industrial by-Products". *Construction and Building Materials*, Vol. 77, hal. 370-395.
- Kharaziha, M., Fathi, M.H. (2009). "Synthesis and Characterization of Bioactive Forsterite Nanopowder". *Ceramics International*, Vol. 35, hal. 2449-2459.
- Kirillidi, Y., Frogoudakis, E. (2005, September 1-3). "Electric Arc Furnace Slag Utilization", *Proceeding of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology*, Rhode island, Greece, hal. 768-772.

- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Bartzas, G. (2012). "Effect of Sulphate and Nitrate Anions on Heavy Metal Immobilisation in Ferronickel Slag Geopolymers". *Applied Clay Science*, Vol. 73, hal. 103-109.
- Komnitsas K., Zaharaki, D. (2007). "Geopolymerisation : A review and prospects for the minerals industry," *Mineral. Engineering*, Vol. 20, hal. 1261–1277.
- Kong, D.LY., Sanjayan, J.G. (2010). "Effect of Elevated Temperature on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, hal. 334-339.
- Kramar, S., Ducman, V. (2015). "Mechanical and Microstructural Characterization of Geopolymer Synthesized From Low Calcium". *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, Vol. 21(1), hal. 13–22.
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*. New York London: Springer
- Lawrence, C. (1998). "The Constitution and Specifications of Portland Cements". In C. H. Peter, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, hal. 131-188. New York: John Wiley & Sons.
- Li, C., Sun, H., & Li, L. (2010). "Cement and Concrete Research A review : The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements". *Cement and Concrete Research*, Vol. 40(9), hal. 1341–1349.
- Maragkos, I., Giannopoulou, I.P., Panias, D. (2008). "Synthesis of Ferronickel slag-based Geopolymers". *Minerals Engineering*, Vol. 22, hal. 196-203.
- Ma, X., Zhang, Z., Wang, A. (2016). "The Transition of Fly Ash-Based Geopolymer Gels Into Ordered Structures and The Effect on The Compressive Strength". *Construction and Building Materials*, Vol. 104, hal. 25–33.
- McLellan B.C., Williams, R.P., Janine, L., Van Riessen, A., Corder, G.D. (2011). "Costs and Carbon Emissions for Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19(10), hal. 1080-1090.
- Morimoto, M., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J. (1988). "Nomenclature of Pyroxenes". *American Mineralogist*, Vol. 73, hal. 1123-1133.
- Ng, T.S., Voo, Y.I., Fooster, S.J. (2012). "Sustainability with Ultra-High Performance and Geopolymer Concrete Construction". *fardis, M.N. (Ed), Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*, hal. 81-100.
- Neville, A. M. (2004). *Properties of concrete Fourth and Final Edition*. England: Pearson Prentice hall.
- Palomo, A., A. Fernandez-Jimenez, C. Lopez-Hombrados, J.L. Lleyda. (2004). "Precast Elements Made of Alkali-Activated Fly Ash Concrete". *Eighth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*. Las Vegas, USA.
- Palomo, A.; Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T. (1999). "Alkali-activated fly ashes: a cement for the future". *Cement Concrete Res*, Vol. 29, hal. 1323-1329.

- Panias, D., Giannopoulou, I., Perraki, T. (2007). "Effect of Syntesis Parameters on the Mechanical Properties of Fly-Ash Based Geopolymers". *Colloids and Surface A: Physicochemical Engineering Aspects*, Vol. 301, hal. 246-254.
- Provis, J. S. J. van D. (2009). *Geopolymers (Structure, processing, properties and indusrial applications)*. Boca raton Boston New York: Woodhead publishing Limited.
- Rangan, B. (2014). "Geopolymer Concrete for Environmental Protection". *The Indian Concrete Journal*, hal. 41-59.
- Reimer, L. (1998). *Scanning Electron Microscopy Physics of Image Formation and Microanalysis*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Sanni, S.H., Khadiranaikar, R.B. (2012). "Performance of Geopolymer Concrete Under Severe Environmental Conditions". *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 3 (2), hal. 394-407.
- Sarathi, D. P.; Nath, P.; Kumar, S. P. (2014). "The Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag Blending with Fly Ash and Activator Content on The Workability and Strength Properties of Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature". *Material and Design*, Vol. 62, hal. 32-39.
- Sinha, D.K., Kumar, A., Kumar, S. (2014). "Development of Geopolymer Concrete from Fly Ash and Bottom Ash Mixture". *Transactions of the Indian Ceramic Society*, Vol. 73 (2), hal. 143-148.
- Škvára, F., Kolár, K., Novotný, J., Zadák, Z. (1981). "The Effect of Cement Particle Size Distribution Upon Properties of Pastes and Mortars With Low Water-to-Cement Ratio". *Cement Concrete reseach*, Vol. 11, hal. 247-255.
- SNI. (2004). *"Semen Portland 15-2049-2004"*. Badan Standardisasi Nasional.
- Sonafrank, G. C. (2010). *"Investigating 21st Century Cement Production in Interior Alaska Using Alaskan Resources"*. Fairbanks North Star Borough: Cold Climate Housing Research Center.
- Sprung, S., Kuhlmann, K., Ellerbrock, H.G. (1985). *"Particle Size Distribution and Properties of Cement", Part II: Water Demand of Portland Cement*. ZKG 9.
- Sugiri, S. (2005). "Penggunaan Terak Nikel sebagai Agregat dan Campuran Semen untuk Beton Mutu Tinggi". *Infrastructure and Built Environment*, hal. 200-207.
- Swanepoel, J.C., Strydom, C.A. (2002). "Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material". *Applied Geochemistry*, Vol. 17, hal. 1143-1148.
- Taylor, H. F. W. (1990). *Cement Chemistry*. San Diago: Academic Prec Inc.
- Thermonicolet. (2001). *"Introduction Fourier Transform Infrared Spectroscopy"*. Verona Road, USA: Thermo Nicolet Corporation.
- Tomkins, B. (2011). *"Chemical Resistance of Geopolymers Concrete Against H2SO4 & NaOH"*. Queensland: Faculty of Engineering and Surveying University of Southern Queensland.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., Lorenzen L. (1997). "The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilize Toxic Metals: Part I. Theory and Applications". *Minerals Engineering*, Vol. 10(7), hal. 659-669.

- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., Lukey, G.C. (2002). "The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash and Kaolinite based Geopolymers". *Chemical Engineering Journal*, Vol. 89, hal. 63-73.
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Devender, J.S.J., Lukey, G.C. (2003). "The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-Based Geopolymers". *Materials Letters*, Vol. 57, hal. 1272-1280.
- Vignes, A. (2011). *"Extractive Metallurgy 1 (Basic Thermodynamics and Kinetics)"*. London: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Wagners. (2011). "EFC: Earth Friendly Concrete". *Product Summary, Vol. 1(7)*, hal. 1-5.
- Wang, G., Thompson, R. G., Wang, Y. (2011). "Hot-Mix Asphalt That Contains Nickel Slag Aggregate Laboratory Evaluation of Use in Highway Construction". *Journal of the Transportation Research Board*, 1–8.
- Wang, G., Wang, Y., & Gao, Z. (2010). "Use of Steel Slag as a Granular Material : Volume Expansion Prediction and Usability Criteria". *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 184(1-3), hal. 555–560.
- Wang, P. Z., Trettin, R. and Rudert, V. (2005). "Effect of Fineness and Particle Size Distribution of Granulated Blast-Furnace Slag on the Hydraulic Reactivity in Cement Systems". *Advances in Cement Research*, Vol. 17, hal. 161-166.
- Weng, L., Sagoe-crentsil, K., Brown, T., and Song, S. (2005) *"Effects of Aluminates on The Formation of Geopolymers"* *Mater. Sci. Eng. B*, Vol. 117, hal. 163–168.
- Xu, H., Van Deventer, J.S.J. (2000). "The Geopolymerisation of AluminoSilicate Minerals". *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 59, hal. 247-266.
- Xu, H., van Deventer, J.S.J. (2000a). "Geopolymerisation od Multiple Minerals". *International Journal Mineral Processing*, Vol. 59, hal. 247-266.
- Yang, T., Yao, X., Zhang, Z. (2014a). "Geopolymer Prepared with high-magnesium Nickel Slag: Characterization of Properties and Microstructure". *Construction and Building Materials*, Vol. 59, hal. 188-194.
- Yang, T., Yao, X., Zhang, Z. (2014). "Quantification of chloride in fly ash-slag-based geopolymer by X-ray Fluorescence (XRF)". *Construction and Building Materials*, Vol. 69, hal. 109-115.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

RIWAYAT HIDUP



Saddam Husin lahir di Kelurahan Putri Ayu Kec. Telanaipura, Kota Jambi pada tanggal 16 Agustus 1990, merupakan anak kedua dari pasangan Ayahanda Syaharuddin dan Ibunda Siti Aisyah. Penulis memulai pendidikan pada jenjang sekolah dasar (SD) pada tahun 1997 di SD 49/IV Telanaipura Kota Jambi, selanjutnya meneruskan pendidikannya di Madrasah Tsanawiyah (MTs) Negeri Model Jambi Tahun 2002. Kemudian pada kenaikan ke kelas IX tahun 2004, penulis pindah dan meneruskan studinya di MTs N Sarolangun. Selanjutnya setelah menyelesaikan pendidikan Tsanawiyah, penulis melanjutkan studi di Madrasah Aliyah (MA) Negeri Sarolangun. Tahun 2008 penulis melanjutkan kuliah di Universitas Jambi Prodi S.1 Kimia Jurusan MIPA Fakultas Sains dan Teknologi. Setelah menyelesaikan studi S1 tahun 2013, penulis mengikuti beasiswa BPPDN Calon Dosen 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal) dengan mengikuti pendidikan Pra S2 Fisika di Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) selama 1 tahun. Selanjutnya mulai melanjutkan studi S2 tahun 2014 di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Penulis bergabung di Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material dan melakukan penelitian tesis tentang Pengaruh Ukuran Partikel terhadap Sifat Fisik-Mekanik Geopolimer Semen Terak Feronikel. Penelitian ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Magister Teknik (MT).

Email: saddam1608@gmail.com

Hp: 082373887696